

## APLICACIÓN DE REGRESIÓN Y OPTIMIZACIÓN COMPUTACIONAL A LAS SIMULACIONES DINÁMICAS PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS EDIFICIOS

***R. Briones Llorente<sup>1</sup>, J. M. Hidalgo Betanzos<sup>2</sup>, J. Á. Martín González<sup>3</sup>, M. Lifi<sup>3</sup>, N. Muñoz Rujas<sup>4</sup>, F. Aguilar Romero<sup>4</sup>***

<sup>1</sup> Universidad de Burgos. Departamento de Matemáticas y Computación. Grupo de Investigación en Ingeniería Energética (iENERGÍA), Burgos, España

<sup>2</sup> Universidad del País Vasco EHU. Departamento de Ingeniería Energética. Grupo de Investigación ENEDI (Energética en la Edificación), Vitoria-Gasteiz, España

<sup>3</sup> Universidad de Burgos. Departamento de Matemáticas y Computación. Grupo de Investigación en Modelización Estadística y Matemática en Ingeniería y Ciencias (MEMIC), Burgos, España

<sup>4</sup> Universidad de Burgos. Departamento de Ingeniería Electromecánica. Grupo de Investigación en Ingeniería Energética (iENERGÍA), Burgos, España

### RESUMEN

La humanidad enfrenta grandes retos a nivel planetario que pueden condicionar la salud y el bienestar de las personas, poniendo incluso en riesgo su supervivencia. Entre ellos está la lucha contra el cambio climático, con dos enfoques: la reducción del aumento de la temperatura media global, y la adaptación a los efectos adversos que provoca, como fenómenos climáticos extremos, desertificación, o aumento de enfermedades respiratorias. Siendo las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente dióxido de carbono, las principales causantes del aumento de la temperatura, y debiéndose a la actividad descontrolada de muchos sectores productivos de la economía a nivel mundial, es fundamental su transformación hacia modelos de desarrollo sostenible que no comprometan la salud y el desarrollo de las generaciones actuales y futuras.

El sector de la edificación en la Unión Europea es responsable del 36 % de estas emisiones, así como del 40 % del consumo de energía primaria. Con la Directiva de Eficiencia Energética en los Edificios se pretende que todos los edificios, nuevos y ya existentes, sean edificios de cero emisiones en 2030 y 2050, respectivamente. Las principales estrategias para los proyectos de nueva edificación o de rehabilitación energética pasan por realizar un estudio exhaustivo del comportamiento energético del edificio a nivel de proyecto o en su estado actual y del ensayo de paquetes de medidas de mejora para la envolvente térmica y las instalaciones. La Agencia Internacional de la Energía, entre otras instituciones, ha desarrollado estudios en este sentido en varios países a nivel de edificio y de distrito, basándose en la simulación energética dinámica de los mismos antes y después de las mejoras para

seleccionar las mejores propuestas técnica, funcional y económicamente viables. Sin embargo, el coste de aprendizaje y computacional para analizar un buen número de combinaciones es bastante elevado.

Con este trabajo se pretende facilitar la realización de estos estudios, tanto para expertos como para usuarios finales no cualificados. Se ha modelizado con OpenStudio (EnergyPlus) un edificio sencillo con dos espacios habitables sin aislamiento térmico en su estado inicial. Se han ensayado las 100 combinaciones posibles de aumentar el espesor de los aislamientos en incrementos de 3 centímetros hasta llegar a los 27, tanto en las fachadas como en la cubierta. Se ha empleado un método de cálculo paramétrico para automatizar el trabajo, evitando así hacer manualmente todas esas simulaciones. Finalmente, y como principal aportación, se ha optimizado la eficiencia energética en función de las dos variables en estudio (los dos aislamientos) usando regresión multivariante en primer término y optimización numérica (búsqueda de máximos y mínimos) posteriormente. Dichos procedimientos se han implementado en Matlab. Esta metodología identifica combinaciones óptimas de aislamientos, teniendo en cuenta diferentes indicadores, como las demandas y consumos energéticos, las emisiones de dióxido de carbono, o los costes de inversión. Además, se han podido generar funciones sencillas para que un usuario no experto calcule directamente cómo influyen los distintos espesores de aislamiento elegidos en los resultados finales de los distintos indicadores.

**PALABRAS CLAVE:** eficiencia energética, optimización computacional, regresión, simulación energética.

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los mayores desafíos globales, ya que afecta directamente a la salud y el bienestar de las personas mediante fenómenos climáticos extremos, desertificación y aumento de enfermedades [1]. Para afrontarlo, se plantean dos líneas de acción: mitigar el incremento de la temperatura media global y adaptarse a sus efectos. Ambas implican elevados costes económicos para la reparación y adaptación de infraestructuras, así como por el incremento del gasto sanitario [2].

Las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente el CO<sub>2</sub>, son la principal causa del calentamiento global y provienen en gran medida de actividades productivas intensivas en energía, que es imprescindible transformar hacia modelos sostenibles [3]. En la Unión Europea, el sector de la edificación es responsable de aproximadamente el 40 % del consumo de energía primaria y del 36 % de las emisiones de CO<sub>2</sub>, lo que evidencia la necesidad de mejorar el diseño, la gestión y la eficiencia energética de los edificios, especialmente en su envolvente térmica y sistemas de climatización [4]. Estas acciones están alineadas con la Agenda 2030 [5] y varios Objetivos de Desarrollo Sostenible, como energía asequible y no contaminante, ciudades sostenibles y acción por el clima. La descarbonización del parque edificatorio puede mejorar la calidad de vida y reducir la pobreza energética.

El análisis energético mediante simulación dinámica permite evaluar medidas de mejora energética técnica y económicamente viables. Experiencias internacionales han demostrado la rentabilidad de combinar eficiencia energética y energías renovables a nivel de distrito [6]. A partir de estas lecciones aprendidas, se propone un método simplificado basado en simulación energética, análisis paramétrico,

regresión multivariante y optimización numérica, que facilite a expertos y usuarios no cualificados identificar soluciones óptimas de aislamiento según indicadores energéticos y económicos.

## 2. DESARROLLO / METODOLOGÍA

### 2.1. Modelo geométrico del edificio para el caso de estudio

Se ha empleado un modelo de edificio sencillo como caso de estudio, con un objeto de sombra externo, como se puede apreciar en la “Figura 1”. La modelización en 3 dimensiones, se ha realizado con el programa SketchUp 2026 [7], si bien se puede emplear la versión de 2017 que es gratuita.

El edificio tiene dos espacios habitables acondicionados rectangulares de 5 m × 10 m, con una superficie interior total de 100 m<sup>2</sup>, y una altura variable entre 3 m y 5 m. Así, el volumen interior total es de 400 m<sup>3</sup>. Las cubiertas son inclinadas a un agua. La fachada principal está orientada al Norte, y sólo ella dispone de huecos: una puerta y dos ventanas. La razón, es evitar la influencia del soleamiento en este estudio, pues sólo se va a estudiar el efecto de los aislamientos en los cerramientos opacos.

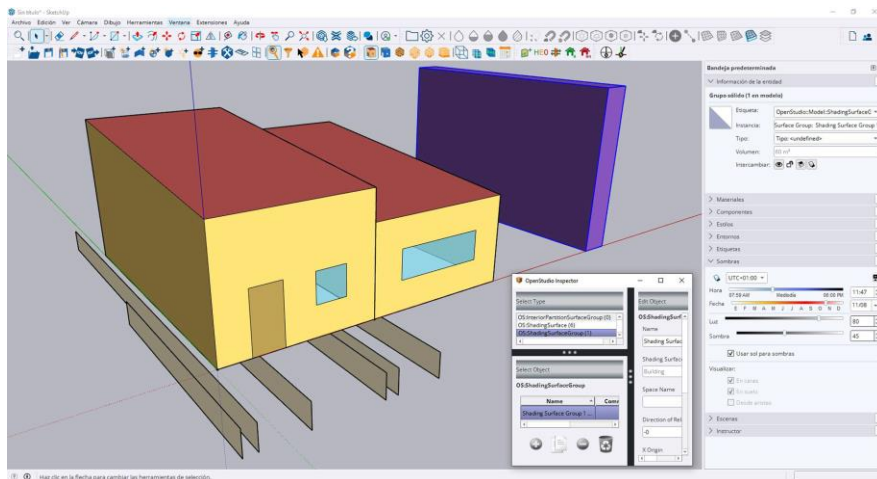


Figura 1. Modelización geométrica del edificio

### 2.2. Descripción constructiva y operacional del edificio

La caracterización constructiva y operacional del edificio, se ha hecho con el programa SG SAVE [8], que permite justificar el DB-HE Ahorro de Energía [9] y realizar la Certificación Energética de los Edificios. En la Tabla 1 figuran los valores de la transmitancia térmica lineal para los puentes térmicos, en su caso más desfavorable, que se mantendrán constantes.

**Tabla 1.** Transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos

Puente térmico lineal	Pilar fachada	Jamba	Dintel	Alféizar	Capialzado	Frente forjado	Cubierta plana	Esquina	Suelo terreno
Transmitancia térmica lineal (W/mK)	0,97	0,06	0,10	0,10	0,04	0,02	0,05	-0,20	-0,02

En las Tabla 2 se muestra la descripción constructiva de las capas de los cerramientos opacos de la envolvente térmica, desde el exterior al interior. Los espesores de los aislamientos térmicos de las fachadas y cubiertas serán las dos variables para este estudio, pudiendo tomar los siguientes diez valores durante los cálculos paramétricos: 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 y 27 cm. Las carpinterías exteriores, estarán formadas por marcos de aluminio con rotura de puente térmico (RPT < 12 mm), con una transmitancia térmica ( $U = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), y con una absorptividad a la radiación solar ( $\alpha = 0,75$ ). Además, contarán con vidrios dobles con una transmitancia térmica ( $U = 3,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), y con un factor solar ( $g = 0,80$ ). La permeabilidad será de  $27 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$  a 100 Pa.

El edificio se ha situado en la ciudad de Burgos, que es representativa de la zona climática E1 según el DB-HE, con protagonismo de inviernos severos y largos. El perfil de uso elegido es el Residencial.

**Tabla 2.** Descripción constructiva de los cerramientos opacos de la envolvente térmica

Material constructivo	Espesor (cm)	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kgK)
Suelo en contacto con el terreno				
Arena y grava	30	2	1.450	1.050
Losa de hormigón armado	20	2,5	2.600	1.000
Aislamiento térmico XPS	4	0,029	30	1.000
Solera de mortero de cemento	4	0,55	1.125	1.000
Solado de terrazo	3	1,3	1.700	1.000
Fachada				
Fábrica de ladrillo cara vista	11,5	0,991	2.170	1.000
Enfoscado de mortero de cemento	1	0,55	1.125	1.000

Aislamiento térmico MW	Variable	0,031	40	1.000
Tabique de ladrillo hueco sencillo	4,5	0,445	1.000	1.000
Guarnecido y enlucido de yeso	1	0,4	900	1.000
<b>Cubierta</b>				
Teja de arcilla cocida	2	1	2.000	800
Aislamiento térmico XPS	Variable	0,029	30	1.000
Enfoscado de mortero de cemento	4	0,55	1.125	1.000
Forjado unidireccional con bovedilla cerámica	25	0,908	1.220	1.000
Guarnecido y enlucido de yeso	1	0,4	900	1.000

### 2.3. Simulación energética, cálculos paramétricos y estudio económico básico

Para analizar 100 combinaciones de espesores de aislamiento —incrementos de 3 cm hasta 27 cm en fachadas y cubiertas— sería necesario realizar cien simulaciones energéticas individuales y recopilar manualmente los resultados, lo que supondría un elevado coste computacional y temporal, además de un alto riesgo de errores.

Como alternativa, tras definir el edificio con SketchUp y SG SAVE, se utilizó OpenStudio para ejecutar una simulación energética con EnergyPlus [10], ambos programas gratuitos y de código abierto que permiten modelar edificios complejos mediante simulaciones dinámicas horarias. Con su herramienta jEPlus, y utilizando el lenguaje Python, se realizó un estudio paramétrico automatizado otras 99 simulaciones energéticas, variando únicamente los espesores de aislamiento hasta los 27 cm en intervalos de 3 cm. Así, se obtuvo una matriz de datos de 100 filas, analizable en hojas de cálculo.

Con las demandas energéticas se estimaron los consumos anuales considerando los rendimientos establecidos en el DB-HE: una caldera de gas natural (92 %) para calefacción y una bomba de calor eléctrica (SEER 260 %) para refrigeración. Las emisiones de CO<sub>2</sub> se calcularon aplicando factores de paso oficiales: 0,252 kgCO<sub>2</sub>/kWh para el gas natural, y 0,331 kgCO<sub>2</sub>/kWh para la electricidad. Los costes energéticos se determinaron con precios utilizados en certificaciones energéticas: 0,039 €/kWh para el gas natural, y 0,14 €/kWh la electricidad. Finalmente, la estimación de costes de inversión se realizó con el Generador de Precios de CYPE [11], considerando coste nulo en el caso inicial sin aislamiento, según figura en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Costes de inversión totales en para fachadas y cubiertas

Envolvente térmica	Coste de inversión totales (€)									
	0 cm	3 cm	6 cm	9 cm	12 cm	15 cm	18 cm	21 cm	24 cm	27 cm
Fachadas 164 m <sup>2</sup> MW	0,00	2.000,80	4.001,60	5.953,20	8.003,20	10.000,04	12.000,04	14.005,60	16.006,40	18.007,20
Cubiertas 101 m <sup>2</sup> XPS	0,00	1.474,60	2.949,20	4.423,80	5.898,40	7.373,00	8.847,60	10.322,20	11.796,80	13.271,40

Finalmente, para realizar un estudio básico de tipo coste – efectividad, se ha calculado el ahorro conseguido a los 10 años, a los 20 años y a los 30 años. Se ha computado como pérdida económica el coste total de inversión, y como ganancia, el ahorro producido en el gasto total de energía para cada periodo, comparándolo con el gasto energético del estado inicial sin aislamientos térmicos.

Así, se han estudiado 4 indicadores anuales para calefacción, refrigeración y en conjunto: demandas energéticas, consumos energéticos, emisiones de CO<sub>2</sub> y gastos energéticos. Además, los costes de inversión en las fachadas, en las cubiertas y totales; y el ahorro obtenido a los 10, a los 20 y a los 30 años. En total, son 18 indicadores.

#### 2.4. Regresión multivariante y optimización numérica

A partir de la tabla de resultados de la hoja de cálculo, es sencillo identificar valores máximos y mínimos de los 18 indicadores analizados, pero resulta más complejo obtener valores intermedios y estudiar tendencias. Para ello, se aplicó un método basado en regresión multivariante y optimización numérica mediante la herramienta Curve Fitter de Matlab [12], aunque también podrían emplearse programas de acceso libre y código abierto como R Software [13]. El objetivo es relacionar dos variables independientes o regresores —X (espesor del aislamiento en fachadas) e Y (espesor del aislamiento en cubiertas)— con una variable dependiente o respuesta Z, correspondiente a cualquiera de los 18 indicadores. Se importan a Matlab los tres vectores con 100 datos cada uno y se realiza un ajuste polinómico, por tratarse de una función fácil de manejar posteriormente en calculadoras u hojas de cálculo. Se prueban distintos grados del polinomio hasta alcanzar un coeficiente de determinación  $R^2 \geq 0,90$ , lo que indica que al menos el 90 % de la variabilidad de Z queda explicada por el modelo. En todos los casos se emplea un nivel de confianza del 95 %. Una vez obtenido el polinomio, basta con introducir valores de espesor en fachadas y cubiertas —dentro del intervalo continuo [0,00; 0,27] m— para estimar el valor del indicador correspondiente. Además, mediante el gradiente de la función es posible analizar la dirección de cambio más rápida de la variable Z, lo que facilita la optimización. El modelo puede representarse gráficamente como una superficie de respuesta tridimensional (X, Y, Z), permitiendo visualizar máximos, mínimos y tendencias. De forma complementaria, pueden utilizarse diagramas de curvas de nivel o de contorno en dos dimensiones, donde Z se representa mediante líneas de igual valor. El uso de gradientes de color mejora la interpretación visual de los resultados.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como primer resultado, se ha generado una matriz de datos con 100 filas, una para cada combinación de espesores de aislamientos en las fachadas y en las cubiertas, y 21 columnas: 3, con el número de combinación y los espesores de los dos aislamientos de cubiertas y fachadas, y otras 18, con los resultados de los indicadores ya explicados. Como aportación más novedosa, se han obtenido polinomios mediante regresión multivariante y optimización numérica, así como representaciones gráficas de superficies de respuesta tridimensionales y diagramas de curvas de nivel, para cada uno de esos indicadores. Como no se pudo incluir en este breve artículo toda la información, dado su volumen, se van a mostrar los resultados más ilustrativos para dos indicadores: las demandas energéticas anuales conjuntas, y el ahorro total obtenido a los 30 años

#### 3.1. Demandas energéticas anuales

Como era previsible, el caso inicial, que no lleva ningún tipo de aislamiento térmico ni en las fachadas ni en las cubiertas, presenta las mayores demandas energéticas: 21.538,51 kWh/año para calefacción; 939,81 kWh/año para refrigeración; y conjuntamente 22.478,32 kWh/año. La demanda energética máxima de calefacción es casi 23 veces superior a la demanda energética máxima de refrigeración, lo que concuerda perfectamente con la zona climática E1 (Burgos) en la que se ha emplazado el modelo de edificio de este caso de estudio. La menor demanda energética para calefacción es de 6.850,56 kWh/año, y se obtiene implementando el máximo espesor de aislamiento térmico, de 27 cm, tanto en las fachadas como en las cubiertas. Con esta misma combinación, se obtiene también la menor demanda energética conjunta, que se reduce más de tres veces respecto al caso inicial, hasta los 6.850,56 kWh/año. Respecto la demanda energética de refrigeración, se anula en 20 de las 100 combinaciones, incluida la que genera la menor demanda energética conjunta. Este hecho, ya indica que no hay una única mejor opción, y justifica la elaboración de cálculos más avanzados.

Se ha obtenido el siguiente polinomio de grado 3, que se representa según la ecuación (1):

$$Z(x, y) = 21.534 - 164.250x - 110.070y + 1.003.900x^2 - 18.536xy + 685.250y^2 - 1.930.500x^3 + 27.431x^2y + 29.093xy^2 - 1.329.600y^3 \quad (1)$$

donde,

Z es igual a la demanda energética anual conjunta (kWh/año)

x es igual al espesor de aislamiento térmico en las fachadas (m)

y es igual al espesor de aislamiento térmico en las cubiertas (m)

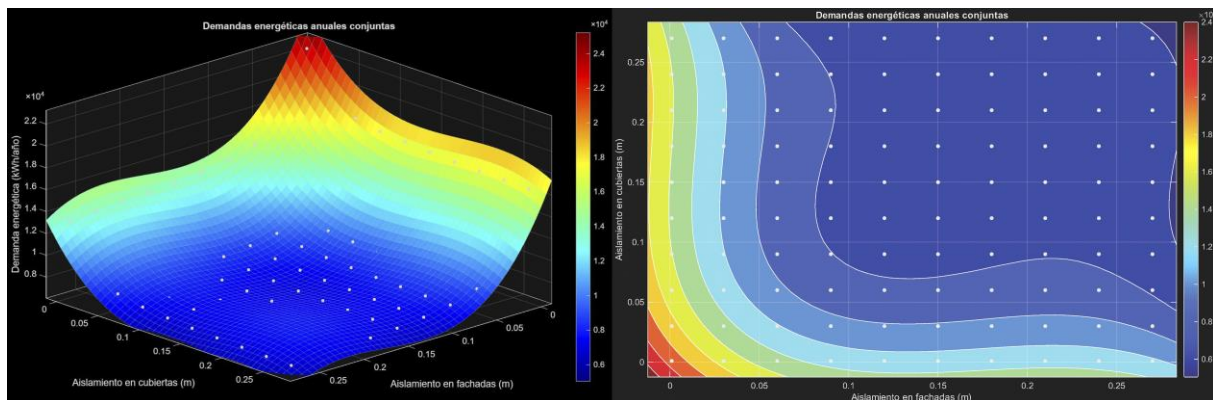
El porcentaje de variabilidad de la variable Z es  $R^2 = 0,95$ .

En el caso inicial ( $x = y = 0,00$  m), se obtiene una  $Z = 21.534,00$  kWh/año. En la hoja de cálculo, se había obtenido un valor de 22.478,32 kWh/año. La diferencia es de 944,32 kWh/año.

En el caso de mayor aislamiento térmico ( $x = y = 0,27$  m), se obtiene una  $Z = 6.199,37$  kWh/año. En la hoja de cálculo, se había obtenido un valor de 6.850,56 kWh/año. La diferencia es de 651,19 kWh/año.

En la “Figura 2a” se muestra la representación gráfica de la ecuación (1) con la superficie de respuesta tridimensional. Se ve fácilmente cómo las demandas energéticas anuales conjuntas van descendiendo con distinta intensidad, según se apliquen distintas combinaciones de espesores de aislamientos en las fachadas y en las cubiertas. La demanda energética máxima corresponde al caso inicial, y la mínima, al caso de mayor aislamiento térmico.

En la “Figura 2b” se muestra la representación de la ecuación (1) en formato de curvas de contorno. Con esta vista en planta, se pueden aproximar los valores de las demandas energéticas anuales conjuntas que se obtendrían al elegir distintas combinaciones de espesores de aislamientos en las fachadas y en las cubiertas, así como detectar los valores máximo y mínimo, respectivamente.



(a)

(b)

**Figura 2.** Representación de la ecuación (1): **(a)** Superficie de respuesta tridimensional. **(b)** Curvas de contorno.

### 3.2. Ahorros económicos

El caso inicial, que no lleva ningún tipo de aislamiento térmico ni en las fachadas, ni en las cubiertas, no va a generar ningún tipo de ahorro económico. A los 30 años, la combinación que ofrece el mayor ahorro económico es la incorporación de 6 cm de aislamiento térmico en las fachadas y 3 cm en las cubiertas, consiguiendo así llegar a los 9.492,14 €. En este periodo, se amortizan 58 combinaciones, y las 41 restantes no serían rentables económicamente. La peor, sería la inclusión del máximo espesor de aislamiento térmico (27 cm) en las fachadas y en las cubiertas, con unas pérdidas de 11.081,20 €. El amplio abanico de opciones intermedias para un estudio de coste – efectividad, justifica la propuesta de cálculos más avanzados para facilitar la toma de decisiones.

Se ha obtenido el siguiente polinomio de grado 3, que se representa según la ecuación (2):

$$Z(x,y) = 1.362 + 144.320x + 92.869y - 1.289.500x^2 + 19.323xy - 883.000y^2 + 2.479.000x^3 - 28.507x^2y - 30.441xy^2 + 1.712.000y^3 \quad (2)$$

donde,

Z es igual a los ahorros económicos totales a los 30 años (€)

$x$  es igual al espesor de aislamiento térmico en las fachadas (m)

$y$  es igual al espesor de aislamiento térmico en las cubiertas (m)

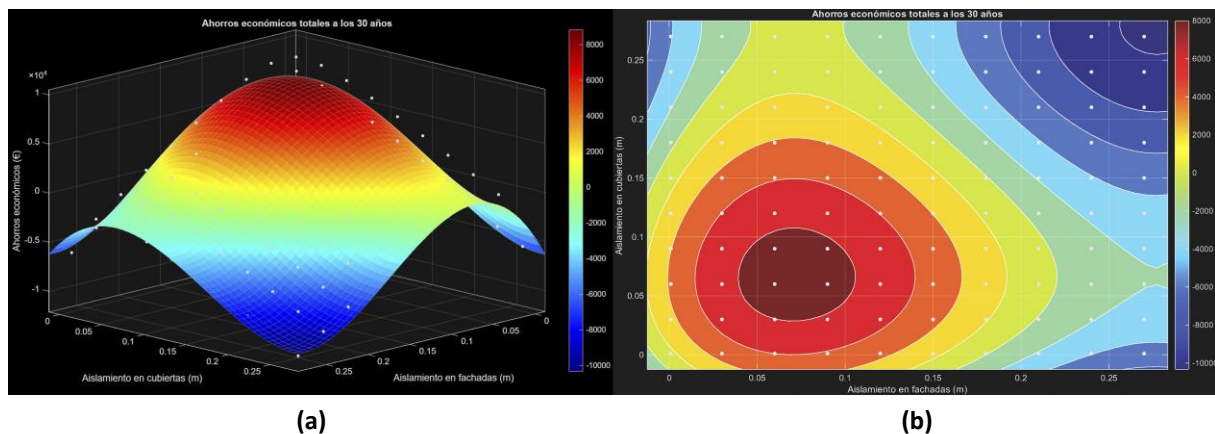
El porcentaje de variabilidad de la variable  $Z$  es  $R^2 = 0,96$ .

En el caso inicial ( $x = y = 0,00$  m), se obtiene una  $Z = 1.362,00$  €. En la hoja de cálculo, se había obtenido un valor de  $0,00$  €. La diferencia es de  $1.362,00$  €. Este valor no es coherente, pues si no se coloca ningún tipo de aislamiento no se producirá ningún ahorro económico ni energético. Luego el polinomio obtenido es válido siempre que:  $x > 0,00$  m;  $y > 0,00$  m, y podría ajustarse más adelante.

En el caso de mayor aislamiento térmico ( $x = y = 0,27$  m), se obtiene una  $Z = -10.232,39$  €. En la hoja de cálculo, se había obtenido un valor de  $-11.081,20$  €. La diferencia es de  $848,81$  €. Ambos valores son negativos, lo que implica pérdidas en la inversión realizada, porque no se amortiza a los 30 años.

En la “Figura 3a” se muestra la representación de la ecuación (2) con la superficie de respuesta tridimensional. Se ve fácilmente cómo los ahorros económicos totales adquieren valores negativos cuando se eligen combinaciones de espesores de aislamientos mayores, aunque sólo sea en las fachadas o en las cubiertas. El ahorro mínimo estaría en el caso de mayor aislamiento, y el máximo ahorro se conseguiría con espesores de entre  $0,01$  m y  $0,05$  m en las fachadas y en las cubiertas.

En la “Figura 3b” se muestra la representación de la ecuación (2) en formato de curvas de contorno. Con esta vista en planta, se pueden aproximar los valores de los ahorros económicos totales que se obtendrán al elegir distintas combinaciones de espesores de aislamientos en las fachadas y en las cubiertas, así como detectar los valores máximo y mínimo, respectivamente.



**Figura 3.** Representación de la ecuación (2): **(a)** Superficie de respuesta tridimensional. **(b)** Curvas de contorno.

#### 4. CONCLUSIONES

El sector de la edificación es uno de los principales responsables de las emisiones de  $\text{CO}_2$  en la Unión Europea y, por tanto, un actor clave tanto en la mitigación como en la adaptación al cambio climático. Aunque existen numerosas iniciativas orientadas a su descarbonización para 2050, los estudios

basados en simulación energética y análisis coste-efectividad, aun siendo ampliamente aceptados por técnicos e investigadores, implican elevados costes de tiempo, computación y aprendizaje.

El artículo propone un método de trabajo estructurado, aplicado a un edificio sencillo como caso de estudio, que permite realizar 100 simulaciones energéticas: una inicial sin aislamiento térmico y 99 combinaciones adicionales con incrementos de 3 cm en los aislamientos de fachadas y cubiertas, hasta un máximo de 27 cm. Mediante cálculos paramétricos automatizados, se evita la repetición manual de simulaciones, y los resultados se exportan a una hoja de cálculo para su análisis.

A partir de estos datos, se emplean técnicas de regresión multivariante y optimización numérica para generar modelos polinómicos que describen el comportamiento de 18 indicadores energéticos y económicos en función de los espesores de aislamiento. Estos modelos permiten a cualquier usuario estimar resultados sin necesidad de manejar software complejo de simulación o cálculo avanzado. Además, se elaboran superficies de respuesta tridimensionales y curvas de contorno que facilitan la interpretación visual de tendencias, valores extremos y combinaciones óptimas.

El método desarrollado presenta una baja barrera de aprendizaje y puede implementarse con software gratuito o de código abierto. Como líneas futuras, se plantea su aplicación a edificios reales más complejos, a escala de distrito y con un mayor número de variables, aunque ello limitaría las posibilidades de representación gráfica.

## 5. AGRADECIMIENTOS

A Josep Sole Bonet, por su ayuda durante el aprendizaje en la realización de cálculos paramétricos.

Al Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Burgos (COAATBU) por tantos años de fructífera colaboración mutua, y por su ayuda para la participación en el CONTART 2026.

Asimismo, este trabajo de investigación está dedicado al Presidente del COAATBU, José Ignacio Pérez Gonzalo, deseándole una pronta recuperación de la mejor manera posible.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

[1] J. H. Diaz, MD, MPH-TM y DrPH, "The influence of global warming on natural disasters and their public health outcomes", *Am J Disaster Med*, vol. 2, no. 1, pp. 33–42, Enero 2007. Disponible: <https://doi.org/10.5055/ajdm.2007.0007>

[2] K. Desmet y E. Rossi-Hansberg, "Climate Change Economics over Time and Space", *Annual Review of Economics*, vol. 16, no. 1, pp. 271–304, Agosto 2024. Disponible: <https://doi.org/10.1146/annurev-economics-072123-044449>

[3] A. Yakymchuk y M. A. Rataj, "Economic Analysis of Fossil CO<sub>2</sub> Emissions: A European Perspective on Sustainable Development," *Energies*, vol. 18, no. 8, p. 2106, Abril 2025. Disponible: <https://doi.org/10.3390/en18082106>

[4] European Council. Council of the European Union (2025, Marzo 17). Fir for 55 [Online]. Disponible: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/>

- [5] United Nations (2015, Septiembre 25). The 2030 Agenda for Sustainable Development [Online]. Disponible: <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- [6] International Energy Agency (2023, Octubre 10). IEA EBC Annex 75 - Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables [Online]. Disponible: <https://annex75.iea-ebc.org/>
- [7] Trimble Inc (2026). SketchUp [Online]. Disponible: <https://www.sketchup.com/es>
- [8] Efinovatic (2026). SG SAVE [Online]. Disponible: <http://www.efinovatic.es/energyPlus/>
- [9] Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana del Gobierno de España (2022, Junio 14). Documento Básico HE Ahorro de energía [Online]. Disponible: <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>
- [10] National Laboratory of the U.S. Department of Energy (2026). EnergyPlus [Online]. Disponible: <https://energyplus.net/>
- [11] CYPE Ingenieros, S.A. (2026). Generador de Precios de CYPE [Online]. Disponible: <https://generadordeprecios.info/>
- [12] The MathWorks Inc. (2026). MATLAB [Online]. Disponible: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [13] R Foundation (2026). R Software [Online]. Disponible: <https://www.r-project.org/>