

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INVESTIGACIÓN EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y
SOSTENIBILIDAD EN INDUSTRIA, TRANSPORTE, EDIFICACIÓN Y URBANISMO**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**ANÁLISIS DE INFLUENCIA DE CARACTERÍSTICAS
CONSTRUCTIVAS EN LA DEMANDA DE
CALEFACCIÓN EN EDIFICIOS RESIDENCIALES:
ESTUDIO EN EL BARRIO DE OTXARKOAGA
(BILBAO)**

Estudiante: *Unai Lekerika Moreno*

Director/Directora: *Jon Terés Zubiaga*

Álvaro Campos Celador

Departamento: *Ingeniería Energética*

Curso académico: *2021-2022*

Bilbao, 26 de junio de 2022

RESUMEN

En el contexto del cambio climático, el sector de la edificación tiene un papel muy importante debido a su consumo energético. La reducción de la demanda energética y las soluciones pasivas son cada vez más necesarias, con el fin de mitigar o intentar frenar el calentamiento global. Debido a esto, el conocimiento de las variables que afectan a la demanda energética de los edificios resulta necesario.

El presente estudio tiene como objetivo identificar y analizar la afección de los diferentes factores constructivos de los edificios en la demanda de calefacción en edificios residenciales, usando como ejemplo el caso de estudio de varias tipologías de edificios ubicados en el barrio Otxarkoaga (Bilbao). Para ello, después de una revisión bibliográfica de estudios previamente realizados en campos similares, se han seleccionado 8 parámetros constructivos de los edificios, mediante los cuales se ha analizado la demanda energética de calefacción en los edificios usando el software Design Builder.

Los resultados muestran que las infiltraciones de aire tienen un papel muy importante en la demanda energética de los edificios, seguidas de la transmitancia térmica de los muros, la transmitancia térmica de las ventanas y el porcentaje del área acristalada de la fachada.

Palabras clave: demanda energética de calefacción, simulación energética de edificios, Design Builder, variables constructivas

LABURPENA

Klima aldaketaren testuinguruan, eraikuntza sektoreak zeregin oso garrantzitsua betetzen du bere energia kontsumo esanguratsua dela eta. Hauen energia eskaria murriztea eta soluzio pasiboak gero eta beharrezkoagoak dira, klima aldaketa murrizteko edo geldiarazteko. Hori dela eta, beharrezkoa da eraikinen energia eskarian eragiten duten aldagaiak ezagutzea.

Ikerketa honen helburua eraikinen eraikuntza faktore ezberdinek etxebizitza eraikinetako berogailu energia eskarian duten eragina identifikatzea eta aztertzea da, Otxarkoaga auzoan (Bilbo) kokatutako hainbat eraikin mota adibide gisa hartuta. Horretarako, alde aurretik antzeko esparruetan egindako ikerketen literatura berrikuspenaren ostean, eraikinen 8 eraikuntza parametro aukeratu dira, eta horien bidez eraikinetako berogailuaren energia eskaria aztertu da Design Builder softwarea erabiliz.

Emaitzek aire infiltrazioek eraikinen energia eskarian garrantzi handia dutela erakusten dute, pareten transmitantzia termikoa, leihoen transmitantzia termikoa eta fatxadako azaleraren leihoen ehunekoa jarraitzen diotelarik.

Hitz gakoak: berogailu energia eskaria, eraikinen simulazio energetikoa, Design Builder, eraikuntza aldagaiak

ABSTRACT

In the context of climate change, the building sector plays a very important role due to its energy consumption. The reduction of energy demand and passive solutions are increasingly necessary, in order to mitigate or try to stop global warming. Due to this, the knowledge of the variables that affect the energy demand of buildings is necessary.

The objective of this study is to identify and analyze the effect of the different construction factors of buildings on the heating energy demand in residential buildings, using as an example the case study of various types of buildings located in the Otxarkoaga neighborhood (Bilbao). For this, after a literature review of studies previously carried out in similar fields, 8 construction parameters of buildings have been selected, through which the heating energy demand in buildings has been analyzed using the Design Builder software.

The results show that air infiltrations play a very important role in the energy demand of buildings, followed by the thermal transmittance of the walls, the thermal transmittance of the windows and the percentage of the glazed area of the facade.

Key words: heating energy demand, building energy simulation, Design Builder, constructive variables

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	1
LABURPENA	2
ABSTRACT	3
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS	5
1. INTRODUCCIÓN	7
2. ALCANCE/OBJETIVO DEL PROYECTO	9
3. ESTADO DEL ARTE	10
4. METODOLOGÍA.....	13
4.1. Caso de estudio.	15
4.1.1. Tipologías de edificios y características	15
4.2. Parámetros a estudiar	17
4.3. Combinatoria de las variables	20
4.4. Automatización de las simulaciones	21
4.5. Simulación	23
5. RESULTADOS	26
5.1.1. Afeción del tipo de edificio	26
5.1.2. Afeción del WWR y el tipo de ventanas	27
5.1.3. Afeción de la orientación.....	29
5.1.4. Afeción del aislante de la fachada	30
5.1.5. Afeción del aislante de la cubierta	32
5.1.6. Afeción de la capa de inercia térmica.....	33
5.1.7. Afeción de las infiltraciones.....	34
5.1.8. Afeción de las ganancias internas.....	35
6. CONCLUSIONES FINALES	36
7. REFERENCIAS	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flujo de trabajo de la metodología propuesta.....	14
Figura 2. Diferentes tipologías constructivas identificadas en Otxarkoaga.....	15
Figura 3. Imágenes aéreas de las tipologías A, E, H baja y H alta (en el orden de izquierda a derecha y de arriba abajo)	16
Figura 4. Escenarios posibles con las variaciones de las variables propuestas.....	20
Figura 5. flujo de bloques del proceso de simulación	22
Figura 6. Ventana de Design Builder donde se modifica el espesor del aislante de fachada y la capa que aporta inercia térmica al edificio	23
Figura 8. Cálculos realizados por Design Builder, partiendo de los datos de la figura 6	24
Figura 7. Representación gráfica de las capas de la fachada (obtenido de Design Builder).....	24
Figura 9. Demanda energética de calefacción en función de las diferentes tipologías de edificios	26
Figura 10. Demanda energética de calefacción en función de diferentes valores de U de ventana y WWR al 20% y al 40% en edificios tipo A	27
Figura 11. Demanda energética de calefacción en función de diferentes valores de U de ventana y WWR en edificios tipo E	27
Figura 12. Demanda energética de calefacción en función de diferentes valores de U de ventana y WWR en edificios tipo H baja.....	28
Figura 13. Demanda energética de calefacción en función de diferentes valores de U de ventana y WWR en edificios tipo H alta.....	28
Figura 14. Demanda energética de calefacción en función de diferentes orientaciones para cada tipología.....	29
Figura 15. Demanda energética de calefacción en función de diferentes espesores de aislante de fachada para para cada tipología (WWR=20%)	30
Figura 16. Demanda energética de calefacción en función de diferentes espesores de aislante de fachada para para cada tipología (WWR=40%)	31
Figura 17. Demanda energética de calefacción en función de diferentes espesores de aislante de cubierta para para cada tipología	32
Figura 18. Demanda energética de calefacción en función de diferentes espesores de capa de inercia térmica para cada tipología.....	33
Figura 19. Demanda energética de calefacción en función del aumento de infiltraciones para cada tipología	34
Figura 20. Demanda energética de calefacción en función de diferentes ganancias internas para cada tipología.....	35
Figura 21. Grado de afección de la variación de las variables identificadas en la demanda energética de calefacción en los edificios de Otxarkoaga	36

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor Jon Terés Zubiaga, quien con sus conocimientos y apoyo me ha guiado en esta investigación.

También quiero agradecer a Milagros Álvarez Sanz, por su valioso aporte en las simulaciones energéticas desarrolladas y en sus automatizaciones, además de su aporte de ideas en diferentes momentos de toma de decisiones.

Por último, quiero agradecer a mi familia y a mis amigos, por el constante apoyo tanto durante el curso académico como en los últimos días de redacción del presente proyecto. En especial, quiero hacer mención de mi pareja, que siempre ha estado ahí y ha sabido darme fuerza mientras compaginaba el trabajo con los estudios.

1. INTRODUCCIÓN

En el creciente calentamiento global, la adaptación al cambio climático y las medidas que favorecen a su mitigación o reducción son cada vez más importantes. Por lo tanto, cada vez se hace más hincapié en las estrategias de ahorro energético y las soluciones de mejoras en la eficiencia energética en los diferentes sectores de la sociedad (desde el ámbito industrial hasta el residencial).

En lo relativo al sector residencial, se determina que los edificios representan alrededor del 40% del consumo mundial de energía y contribuyen con más del 30% de las emisiones de CO₂. Además, una gran parte de esta energía se utiliza para el confort térmico de los edificios [1].

El sector de la construcción es uno de los sectores de uso final de energía más importantes, y representa una proporción mayor del consumo total de energía que la industria y el transporte en muchos países desarrollados. Por ejemplo, en 2004 el sector de la construcción representó el 40%, 39% y 37% de la energía primaria requerida total en EE.UU., el Reino Unido y la Unión Europea [2]. Es por ello por lo que una estrategia para la mitigación del cambio climático es el reducir la demanda energética de una vivienda o edificio.

La demanda energética de un edificio puede depender de muchos factores (que se analizarán en el presente estudio), pero este trabajo está orientado ciertos edificios que, debido a las condiciones o circunstancias de sus construcciones en el pasado, la eficiencia energética actual se ve afectada.

Un ejemplo de estos antecedentes constructivos es el del desarrollismo que se da en España a partir del final de la década de 1950, donde ocurre uno de los procesos de transformación social y económica más importantes en su historia con el crecimiento industrial. Tal es el caso del área industrial del Gran Bilbao, donde los cambios que se dan son mucho más significativos y se presentan algunos de los fenómenos más característicos del desarrollismo español: crecimiento industrial, masiva llegada de inmigrantes, reordenación del espacio urbanístico, etc. [3]

El desarrollismo se ve caracterizado por la deficiente política de la vivienda, la especulación inmobiliaria y la dependencia de la urbanización a los intereses de la industria, dando cascos urbanos desordenados y deteriorados, barrios carentes de infraestructuras higiénicas, chabolismo, hacinamiento... en el panorama del Gran Bilbao. Debido a esto, dar respuesta térmica a los edificios no resulta prioritario en esa época, afectando al comportamiento energético de las construcciones del momento [4].

Partiendo de este ejemplo donde como resultado se dan edificios carentes de una eficiencia energética acorde con los avances tecnológicos actuales, este trabajo pretende realizar un estudio válido no solo para los edificios que se vayan a estudiar, sino también para edificios cuya situación energética actual requiera una mejora en la eficiencia.

Por lo tanto, debe remarcar que las investigaciones orientadas al estudio de los parámetros o factores que influyen en la demanda energética de los edificios de estas características resultan

necesarias a la hora de la toma de decisiones para las posibles propuestas de mejora en lo referente a las variables constructivas de estos.

2. ALCANCE/OBJETIVO DEL PROYECTO

El objetivo del presente proyecto es identificar y analizar la afección de los diferentes factores constructivos de los edificios en la demanda de calefacción en edificios residenciales.

Para ello, el primer objetivo será conocer los factores que se han considerado como los más significantes mediante el análisis de otros estudios previamente realizados.

En segundo lugar, se deberá definir un proceso para ejecutar las simulaciones, que se detallará en el apartado 4.

Como último objetivo, se deberá obtener información útil de estas simulaciones para poder extraer las conclusiones necesarias para el objetivo principal.

El presente proyecto es motivado con el fin de aportar conclusiones relevantes a la hora de la toma de decisiones en el estudio que se halla realizando Milagros Álvarez Sanz, donde se pretende desarrollar un modelo predictivo en la demanda de calefacción.

Además, en el equipo de ENEDI [5] existe un trabajo previo que trata de automatizar unas simulaciones energéticas en edificios, con el fin de ahorrar tiempo y evitar posibles errores humanos a la hora de insertar los datos manualmente [6].

3. ESTADO DEL ARTE

El comportamiento energético de los edificios depende de diferentes factores, tanto constructivos como de hábitos energéticos de las/los ocupantes. Además, el conocimiento de los parámetros que afectan a la demanda de energía de los edificios resulta necesario a la hora de diseñar un edificio en una obra nueva, al igual que a la hora de realizar una rehabilitación energética siendo estos parámetros donde se debe centrar la atención en estas actuaciones.

En este apartado se identifican las variables constructivas más significativas en lo que respecta a la demanda energética de un edificio.

Para ello, se han consultado en diferentes artículos científicos las variables que se han considerado para el cálculo de la demanda energética en una vivienda o a nivel distrito.

Tal y como señalan A. Pastor et al. [7], la influencia de cada parámetro determina los requerimientos energéticos de calefacción y refrigeración en edificios residenciales. Esta demanda energética se puede estimar a partir de datos básicos constructivos y de operación del edificio, tal y como lo hace J. López Villada [8], o se pueden utilizar bases de datos existentes, como es el caso del estudio realizado por Zangheri et al. [9], que se emplea la base de datos ENTRANZE.

Los estudios sobre la afección de los diferentes parámetros de diseño en el consumo de energía final pueden aportar conclusiones como que

Son muchos los estudios realizados sobre la afección de los parámetros de diseño en el consumo de energía final del edificio, y los resultados son determinantes en las futuras propuestas de mejora. Tal es el ejemplo de Feng et al. [10], quienes concluyen que el grosor del aislamiento de la envolvente, el coeficiente de transferencia de calor de la ventana y la relación entre la ventana y la pared son los principales factores que afectan el consumo de energía del edificio en áreas frías. Por otro lado, los resultados de Yan et al. [11] muestran que el coeficiente de ganancia de calor solar de la ventana externa posee la mayor importancia que afectaba el confort térmico interior y el consumo de energía del edificio. También debe remarcar la importancia de las ganancias de calor internas en la carga de refrigeración las viviendas, tal y como afirman Turgay et al. [12], Ferdyn-Grygierek et al. [13] y F. Ziegler [14]. Además, se ha observado que en estudios como en el de S. Verbeke et al. [15] también se resalta la importancia de la inercia térmica de los edificios en el confort térmico y el uso de energía para calefacción y refrigeración de espacios, donde se determina que una mayor cantidad de masa térmica en el lado interior del aislamiento térmico parece ser beneficiosa para mejorar el confort térmico y reducir la demanda de energía.

Los resultados de estas investigaciones aportan información que puede ayudar a la hora de ofrecer propuestas de reducción de costes, como es el caso de K. Bataineh et al. [16] y Y. Sun [17], quien proporciona un método para optimizar el costo de inversión inicial de los sistemas en un NZEB.

Además del ahorro económico, también se proponen mejoras en los diseños de edificios estudiados, como lo hacen L. Hou et al. [18], mostrando que la mejora del aislamiento térmico

de la envolvente y la infiltración, y el diseño solar pasivo podrían tener un gran potencial de ahorro de energía, o A. Pastor et al. [7], quienes analizan los factores que optimizan el rendimiento de los sistemas de calefacción, ventilación, climatización y agua caliente sanitaria y la integración de las renovables en cada uno de ellos.

Se ha observado que las investigaciones pueden aportar conclusiones relevantes en diferentes tipos de construcciones. Por ejemplo, son muy comunes los estudios en edificios del tipo NZEB (Nearly Zero Energy Building) [16] [19] [10] [20] [21], edificios separados de una sola planta [16], estudios de una sola habitación [22], estudios a nivel distrito [8] [23] [24][19, oficinas [23], edificios residenciales [25] [26] [27] [28], un tipo de edificio en concreto [29], edificios escolares [30], comparativa entre diferentes tipos de edificios [9] [31] ...

Estas investigaciones se llevan a cabo mediante programas de simulaciones energéticas, de las cuales las más comúnmente usados son Design Builder [16] [25] [12] con el motor de simulación EnergyPlus [32] [24] [23] [21]. [19] [9], seguido por TRENYS [8] [11] [17], habiéndose identificado adicionalmente otros programas como LIDER [7], Beopt [16], DEST [10], OpenStudio [31], etc.

Después del análisis del estado actual de las investigaciones relacionadas con el tema que se trata en el presente proyecto y a sus necesidades, en la siguiente tabla 1 se resume el número de artículos o investigaciones en los que se menciona cada variable identificada que afecta en la demanda de calefacción:

VARIABLE	Nº DE MENCIONES	REFERENCIAS
Transmitancia térmica del vidrio	15	[7] [16] [10] [20] [18] [32] [24] [23] [25] [31] [21] [19] [11] [12] [15]
Transmitancia térmica de la fachada	14	[9] [20] [18] [32] [24] [23] [25] [31] [21] [19] [11] [12] [27] [15]
Transmitancia térmica de la cubierta	12	[20] [18] [32] [24] [23] [31] [21] [19] [11] [12] [27] [15]
WWR	10	[16][9] [32] [24] [23] [25] [31] [21] [19] [17]
Factor solar del vidrio (SHGC)	9	[7] [16] [18] [32] [24] [25] [31] [19] [11]
Transmitancia térmica del suelo	9	[20] [18] [32] [24] [31] [21] [19] [11] [12]
Tasa de renovación del aire	8	[7] [8] [18] [32] [23] [17] [27] [9]
Espesor aislante de la fachada	6	[7] [16][9] [8] [32] [17]
Orientación	6	[7] [16] [24] [25] [31] [21]
Infiltraciones	6	[16] [18] [25] [21] [27] [9]
Ganancias internas	5	[12] [26] [30] [13] [14]
Superficie útil de cada planta	5	[20] [8] [32] [25]
Inercia en la fachada	4	[7] [29] [15] [28]
Inercia en la cubierta	4	[7] [29] [15] [28]
Espesor aislante de la cubierta	4	[16] [8] [32] [17]
Temperatura calentamiento	3	[16] [18] [23]
Temperatura enfriamiento	3	[16] [18] [23]
Tipologías de edificios	2	[24] [31]
Tratamiento puentes térmicos	2	[7] [8]
Altura de plantas	2	[8] [31]
Numero de plantas del edificio	2	[8] [12]
Transmitancia térmica muros internos	1	[18]
Proyección de sombras	1	[7]
Área cerramientos exteriores	1	[8]
Compacidad del edificio	1	[8]

Tabla 1. Menciones de las variables que afectan a la demanda energética de los edificios en diferentes referencias

4. METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos descritos en el apartado 2, se seguirá una metodología de trabajo compuesta por 6 fases.

En primer lugar, se identifica y presenta el caso de estudio: el barrio Otxarkoaga (Bilbao). Este barrio resulta muy apropiado para el caso de estudio por dos razones principales. En primer lugar, las tipologías de edificios que presenta responden a unas características que se dieron en muchas zonas durante los años 60 y a día de hoy un número importante de edificios responde a ese patrón. En segundo lugar, este barrio ha sido estudiado en detalle en otros estudios [6] [33], lo que permitirá trabajar con un modelo validado y contrastado contra datos medidos.

Una vez seleccionado el caso de referencia, se identifican qué parámetros van a ser analizados. Se estudiará la variable de cada parámetro que se modificará, terminando por darles diferentes valores para los diferentes casos de las simulaciones.

Después se mostrará la combinatoria de los parámetros o factores incluidos en la fase anterior, dando lugar a 204.800 escenarios diferentes.

Posteriormente, se detallará la automatización de las simulaciones en Design Builder.

En la siguiente fase se determinarán los valores que se modificarán en Design Builder con las simulaciones.

Por último, se analizarán los resultados, tratando de buscar la forma óptima de representar el gran volumen de casos simulados y sacando las conclusiones más relevantes.

En la siguiente figura 1 se representa el flujo de trabajo de forma resumida:

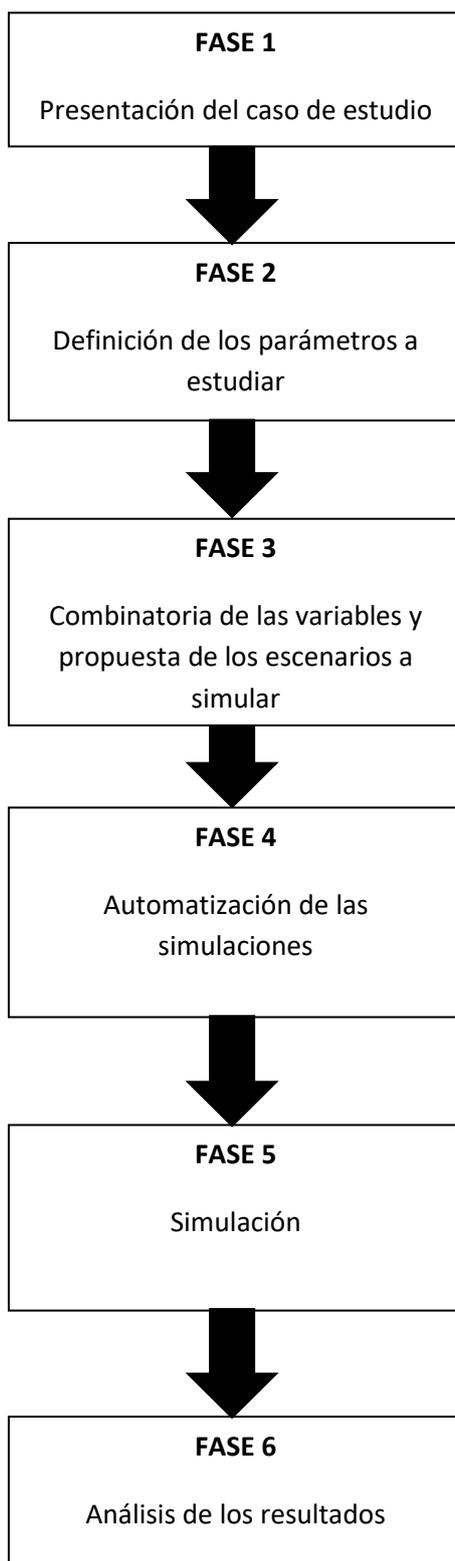


Figura 1. Flujo de trabajo de la metodología propuesta

4.1. Caso de estudio.

4.1.1. Tipologías de edificios y características

El estudio tomará como muestra los edificios del barrio Otxarkoaga de Bilbao. Tal y como se ha mencionado, este barrio se utilizará como referencia para el estudio, ya que las tipologías de edificios que presenta responden a unas características que se dieron en muchas zonas durante los años 60 y a día de hoy un número importante de edificios responde a ese patrón.

Además, tal y como se ha mencionado anteriormente, este barrio ha sido estudiado en detalle en otros estudios [6] [33], lo que permitirá trabajar con un modelo validado y contrastado contra datos medidos.

Características constructivas de los edificios

Siendo la tipología entre los edificios de Otxarkoaga muy parecida, resulta una ubicación muy interesante para realizar la investigación propuesta, mostrándose en la figura 2 las tipologías identificadas:

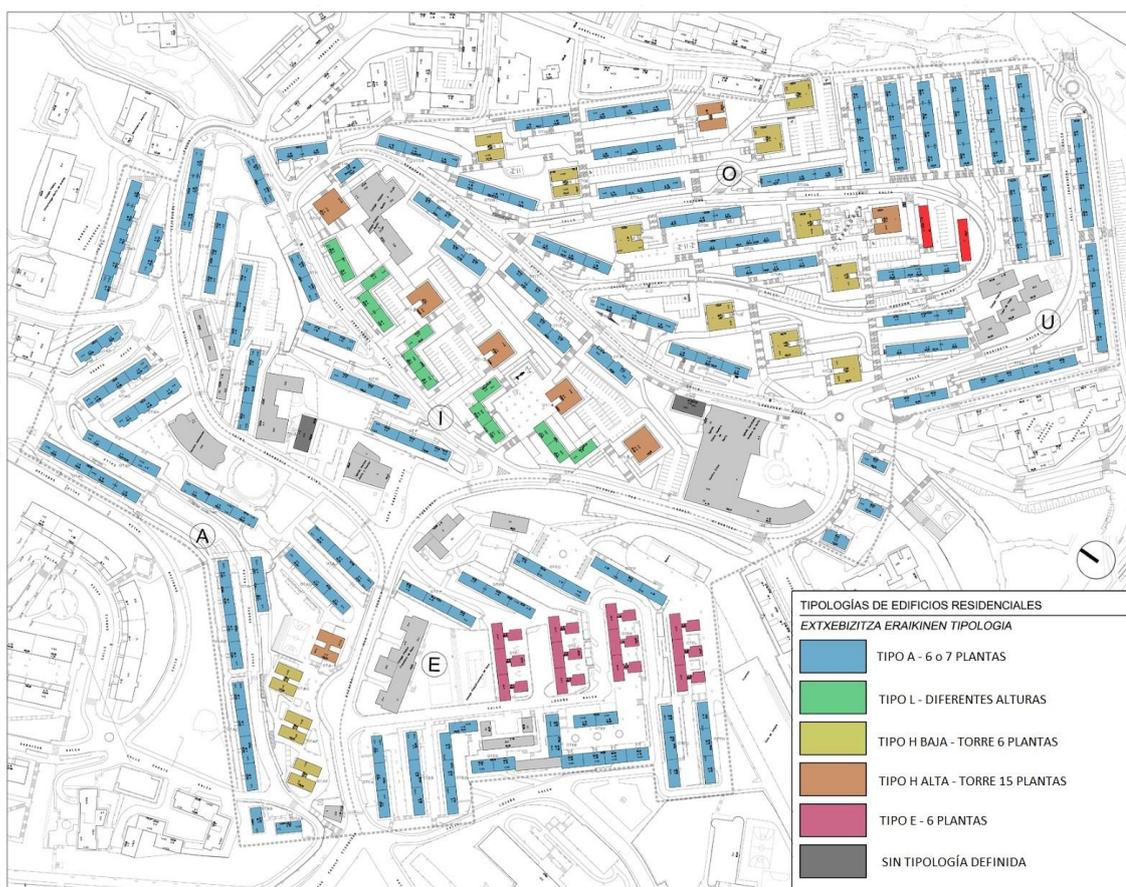


Figura 2. Diferentes tipologías constructivas identificadas en Otxarkoaga

En la siguiente figura 3 se presentan distintas imágenes aéreas de las tipologías A, E, H baja y H alta, ya que serán estas las que se estudiarán:



Figura 3. Imágenes aéreas de las tipologías A, E, H baja y H alta (en el orden de izquierda a derecha y de arriba abajo) [42]

4.2. Parámetros a estudiar

Después de la revisión bibliográfica y la identificación de los factores que afectan en la demanda de calefacción de los edificios, el estudio se centrará en el análisis de la influencia de los siguientes factores:

- **Window to Wall Ratio (%):** se define como el porcentaje de área de ventana que tiene una fachada, siendo su fórmula la siguiente:

$$WWR (\%) = \frac{\sum \text{Área ventana (m}^2\text{)}}{\sum \text{Área de muro exterior (m}^2\text{)}}$$

- **Orientación:** se refiere a la orientación que presenta un edificio respecto al sur
- **Transmitancia térmica (W/m²K):** también conocida como valor U, es la tasa de flujo de calor dividida por el área y la diferencia de temperatura en los alrededores de ambos lados de un sistema en estado estacionario; y es un concepto utilizado para definir las propiedades de aislamiento de los materiales de construcción. Los elementos de construcción con valores U más bajos son más efectivos para reducir el consumo de energía en los edificios debido a su capacidad para aislar de las condiciones climáticas externas. Se estudiará la transmitancia térmica en la fachada, cubierta y ventanas.
- **Infiltraciones (renovaciones/hora):** es el transporte masivo de aire a través de fugas en la envolvente del edificio y es causada por diferencias de presión a lo largo de la envolvente. La pérdida de calor por infiltración es el producto de la infiltración y la diferencia de temperatura [34]:
- **Ganancias internas (W/m²):** las principales fuentes de ganancias internas son los ocupantes, los dispositivos de iluminación y los equipos eléctricos [35].
- **Inercia térmica:** capacidad de determinados elementos, arquitectónicos en este caso, para almacenar calor, conservarlo y liberarlo de una manera paulatina permitiendo un menor uso de sistemas mecánicos de calefacción e incluso de refrigeración [36]
- **Tipología del edificio:** Para simplificar el estudio, quedarán fuera los edificios sin tipología identificada y los de tipología L, ya que estos últimos se componen de dos bloques con diferente número de plantas (ver apartado 4.1.1). Por lo tanto, el análisis se centrará en los siguientes edificios de la tabla 2:

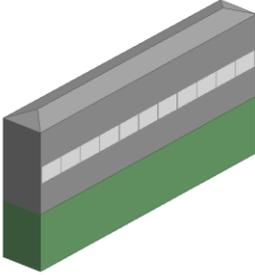
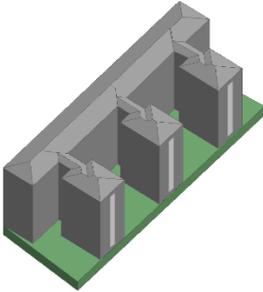
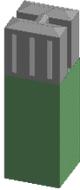
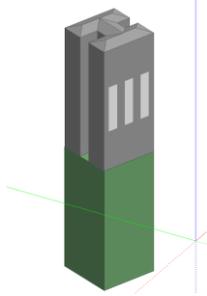
TIPOLOGÍAS INCLUIDAS EN EL ESTUDIO		
Tipología A		6 plantas
Tipología E		6 plantas
Tipología H (baja)		6 plantas
Tipología H (alta)		15 plantas

Tabla 2. Tipologías de edificios seleccionadas para el estudio

En las simulaciones se va a trabajar con 5 variables: transmitancia térmica efectiva que incluye la transmitancia asociada a cada elemento de la envolvente y los efectos de la ventilación e infiltración (UA_{ef}), las ganancias solares (Q_{sol}), las ganancias internas de los edificios (Q_{int}), la inercia térmica del cerramiento (I_{ter}) y la temperatura de consigna (T_{sp}). La temperatura de consigna es una variable primaria y las 4 primeras son variables secundarias, que a su vez están compuestas por una relación entre otras variables primarias que son las que se modificarán en Design Builder.

Así, el cálculo de la UA_{eff} se calcula tal y como se expone en la siguiente ecuación:

$$UA_{ef} = \sum UA_n + UA_{inf} \quad [37]$$

Donde el $\sum UA_n$ es el sumatorio de las UA de los muros, suelo, cubierta y ventanas del edificio que dependen del área de muro, suelo, cubierta y ventanas (m^2) y sus respectivos valores de U (W/m^2K). En Design Builder, lo que se modificará es la U_{muro} (espesor de aislante en metros), $U_{cubierta}$ (espesor de aislante en metros) y $U_{ventana}$ (diferentes tipos de ventanas). Los otros datos se obtienen de los resultados de las simulaciones. La UA_{inf} depende del volumen útil edificado (m^3), la densidad del aire ($1,225 \text{ kg}/m^3$), el calor específico del aire ($1007 \text{ J}/\text{kgK}$) y los cambios de aire por hora ($(\text{ren}/h) / 3600$), siendo este último parámetro lo que se modificará en Design Builder.

En lo relativo a las ganancias solares, éstas se consideran mediante la superficie sur equivalente (SSE) (m^2), el factor solar del vidrio y la irradiación sur del edificio por superficie de área (kWh/m^2). La SSE es un parámetro propuesto por Catalina et al [38] que representa el área acristalada y su distribución por las diferentes orientaciones de las fachadas en un solo parámetro. Este parámetro se calcula por el sumatorio de la multiplicación del área de la superficie acristalada en una orientación por el coeficiente de dicha orientación, coeficientes que representan el porcentaje de incidencia solar que recibe una superficie vertical orientada en una determinada orientación en comparación a la que recibiría en una orientación sur (los coeficientes de orientación son únicos para cada climatología [6]). Por lo tanto, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$SSE = \sum A_i \cdot C_i \quad [38]$$

Para la variación de las ganancias solares, en Design Builder se modificará la orientación del edificio y el factor solar del vidrio. Los otros datos se obtienen de los resultados de las simulaciones.

El aporte de ganancias internas será el resultante de la multiplicación de las ganancias internas (W/m^2) por el área acondicionada total de todas las plantas (m^2).

En cuanto a la inercia térmica del cerramiento, dependerá del volumen total de la capa que aporta inercia, la densidad de los materiales de la capa y el calor específico de estos, siendo el espesor de la capa lo que se modificará en Design Builder.

4.3. Combinatoria de las variables

Una vez identificadas las variables que se van a modificar en las simulaciones energéticas con Design Builder, se procede a plantear diferentes combinaciones que podrán darse con los diferentes valores asociados a cada variable, resultando un total de 204.800 escenarios a analizar (ver figura 4). Estos escenarios se simularán en Design Builder y en el siguiente apartado 1.1 se detalla el proceso de automatización de las simulaciones.

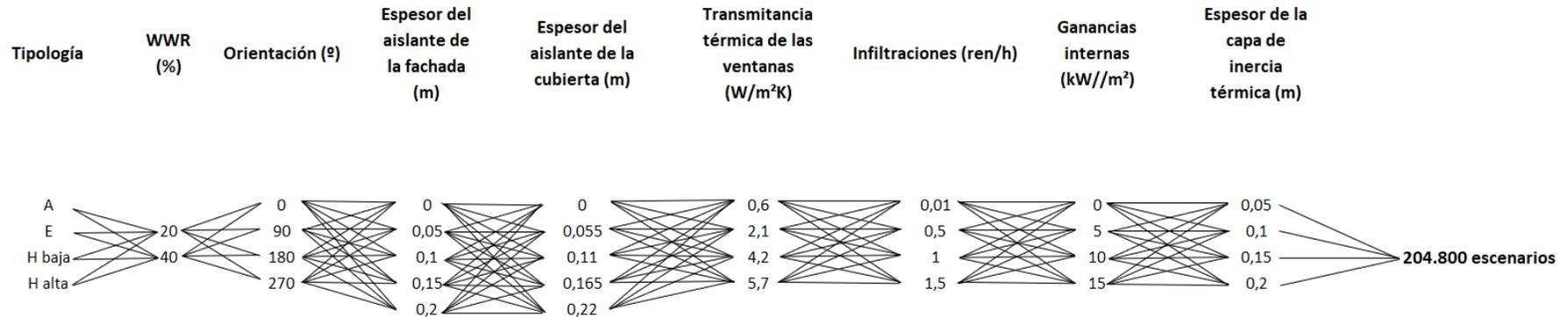


Figura 4. Escenarios posibles con las variaciones de las variables propuestas

4.4. Automatización de las simulaciones

El modelo de referencia se define mediante Design Builder, el cual es un programa para optimizar el diseño eficiente de edificios, que permite realizar simulaciones dinámicas del comportamiento térmico de los mismos, bien sólo con soluciones pasivas o con determinados sistemas de climatización.

Como simulador energético permite utilizar avanzadas funciones de modelado debido a su motor EnergyPlus, facilitando la construcción y diseño [39].

Es un software de simulación energético que explora funciones modulares. Estos módulos funcionan en paralelo con los motores de simulación. Design Builder cuenta actualmente con diez módulos: Modelador 3D Visualización, Simulación, Optimización, Iluminación, Costos, CFD, HVAC, LEED y Scripting. Dichos módulos permiten diversas opciones para el análisis energético, el funcionamiento de la infraestructura y sus posibles fallas [40].

Permite evaluar de forma detallada la ventilación natural del edificio para valorar su impacto sobre el confort en el interior de este. Se pueden obtener análisis comparativos de diferentes propuestas de configuración arquitectónica, considerando la ubicación en la zona, orientación, distribución espacial, etc. [39]

Calcula el consumo de energía y las emisiones de CO₂ del edificio, para unos sistemas de climatización concretos y para el uso de las luminarias y otros equipos, así como evaluar el comportamiento térmico de una configuración determinada, estudiando el impacto que tendrían determinados elementos de obstrucción solar que puedan existir en el entorno.

Por otro lado, el motor de simulación energética ha sido EnergyPlus, el cual es un programa de código abierto desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos [6].

Debido al volumen de casos que se desea analizar, la automatización de las simulaciones resulta necesaria, ya que de este modo se evitarán los errores humanos a la hora de insertar los datos y además se ahorrará tiempo en la ejecución.

EnergyPlus solo acepta entradas de texto (de extensión .idf) y devuelve los resultados separados en varios formatos diferentes (.csv, .txt y .html). Dichos archivos de permiten la modificación y la automatización de simulaciones mediante Phthon (en este caso, se ha usado la librería Eppy), generando archivos de entrada de simulación para EnergyPlus. A su vez, también se integra la librería Geomeppy a la mencionada librería Eppy, para realizar las modificaciones geométricas de la envolvente del edificio [6].

Como se ha mencionado, el cambio de cada escenario supone una iteración en el archivo madre que nutre la información de punto de partida de cada simulación. El archivo de referencia es un .idf básico de partida, al cual se le efectuarán las modificaciones previamente descritas de cada variable [6].

Estas modificaciones se han implementado mediante un script definido por M. Alvarez Sanz [6], el cual, tal y como se representa de manera esquemática en la figura 5, está dividido en 3 bloques para facilitar su comprensión:

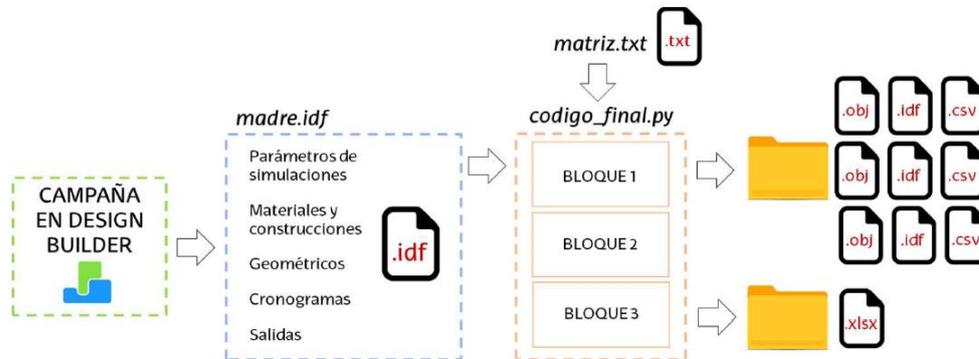


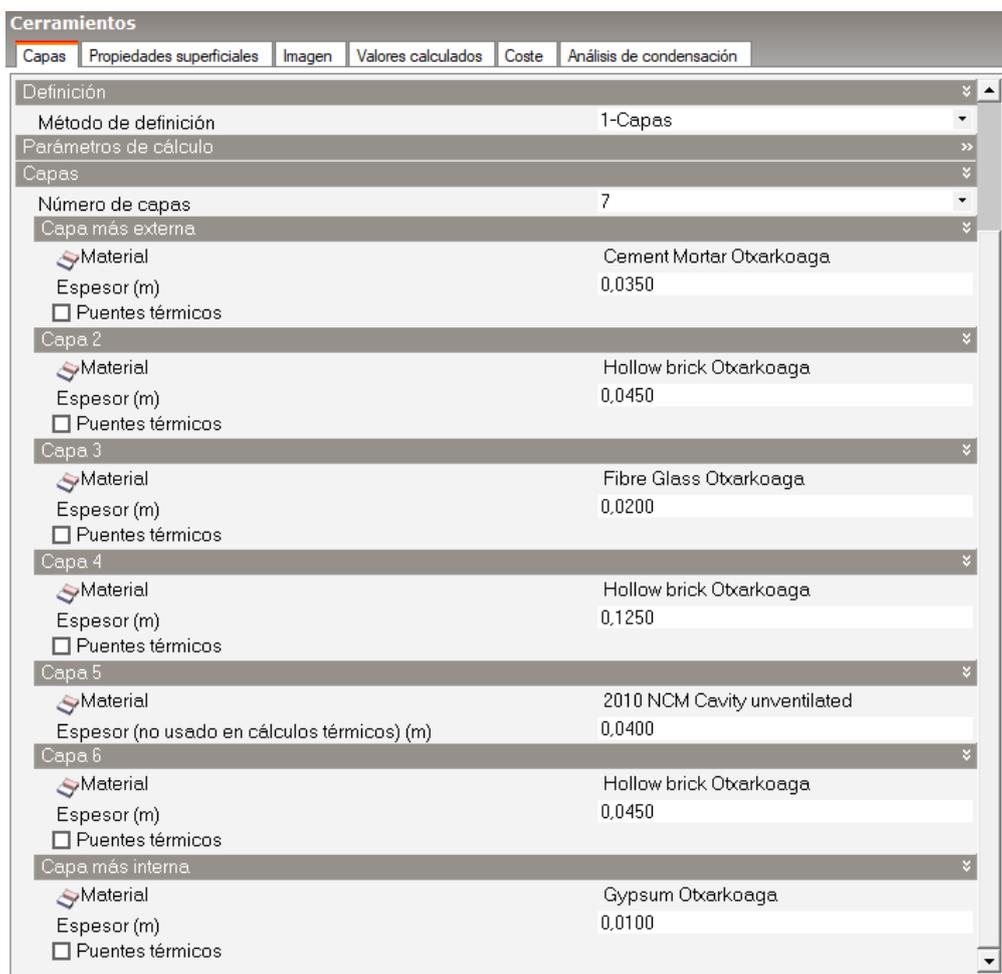
Figura 5. flujo de bloques del proceso de simulación [6]

- **Bloque 1:** posee los datos de cada caso que modifican el archivo madre a cada iteración. Este bloque se encarga de generar los mencionados archivos de texto *.idf*, calcular las variables dependientes y realiza las simulaciones. Después de cada iteración guarda los archivos de salida de cada simulación, los archivo *.idf* y los archivos *.obj* (se pueden abrir con programas de edición de imágenes 3D)
- **Bloque 2:** abre los archivos de salida y los guarda en forma de lista los valores del reporte final
- **Bloque 3:** crea un archivo Excel con los datos de demanda de calefacción mensuales, anuales, detalles geométricos, parámetros de entrada...

4.5. Simulación

Una vez definidos los valores que se usaran para cada variable, el script permite modificar los valores de entrada para cada uno de los escenarios. El script modifica los archivos de texto que sirven como entrada y en Design Builder se hacen los cálculos pertinentes.

El espesor del aislante de la fachada se modifica en la capa 3 de la figura 6 (muestra de una ventana de menú de Design Builder), siendo la fibra de vidrio el material aislante usado aplicándose desde capas más exteriores, entendiéndose como una reforma de la fachada. De igual manera, el espesor de la capa que aporta inercia térmica se modifica en la capa 6 *hollow brick* mostrado en la figura 6, siguiendo la hipótesis de que la inercia térmica la aporta la capa más interna del muro.



Cerramientos	
Capas	
Definición	
Método de definición	1-Capas
Parámetros de cálculo	
Capas	
Número de capas	7
Capa más externa	
Material	Cement Mortar Otxarkoaga
Espesor (m)	0,0350
<input type="checkbox"/> Puentes térmicos	
Capa 2	
Material	Hollow brick Otxarkoaga
Espesor (m)	0,0450
<input type="checkbox"/> Puentes térmicos	
Capa 3	
Material	Fibre Glass Otxarkoaga
Espesor (m)	0,0200
<input type="checkbox"/> Puentes térmicos	
Capa 4	
Material	Hollow brick Otxarkoaga
Espesor (m)	0,1250
<input type="checkbox"/> Puentes térmicos	
Capa 5	
Material	2010 NCM Cavity unventilated
Espesor (no usado en cálculos térmicos) (m)	0,0400
Capa 6	
Material	Hollow brick Otxarkoaga
Espesor (m)	0,0450
<input type="checkbox"/> Puentes térmicos	
Capa más interna	
Material	Gypsum Otxarkoaga
Espesor (m)	0,0100
<input type="checkbox"/> Puentes térmicos	

Figura 6. Ventana de Design Builder donde se modifica el espesor del aislante de fachada y la capa que aporta inercia térmica al edificio

En la figura 7 se muestra una representación gráfica de las capas que posee el edificio con los datos incluidos en la figura 6:

Superficie exterior	
35,00mm	Cement Mortar Otxarkoaga
45,00mm	Hollow brick Otxarkoaga
20,00mm	Fibre Glass Otxarkoaga
125,00mm	Hollow brick Otxarkoaga
40,00mm	2010 NCM Cavity unventilated
45,00mm	Hollow brick Otxarkoaga
10,00mm	Gypsum Otxarkoaga(no está a escala)
Superficie interior	

Figura 7. Representación gráfica de las capas de la fachada (obtenido de Design Builder)

Con los datos de entrada definidos en la figura 6, Design Builder realiza los cálculos mostrados en la figura 8, siendo estos los empleados en las simulaciones del comportamiento energético del edificio.

Cerramientos					
Capas	Propiedades superficiales	Imagen	Valores calculados	Coste	Análisis de condensación
Superficie interior					
	Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² K)		2,152		
	Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² K)		5,540		
	Resistencia superficial (m ² K/W)		0,130		
Superficie exterior					
	Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² K)		19,870		
	Coefficiente de transferencia de calor por radiación (W/m ² K)		5,130		
	Resistencia superficial (m ² K/W)		0,040		
Sin Puentes Térmicos					
	Valor U de superficie a superficie (W/m ² K)		0,859		
	Valor R (m ² K/W)		1,334		
	Valor U (W/m²K)		0,750		
Con puentes térmicos (BS EN ISO 6946)					
	Espesor (m)		0,3200		
	Km - Capacidad térmica interna (KJ/m ² K)		57,6000		
	Límite superior de resistencia (m ² K/W)		1,334		
	Límite inferior de resistencia (m ² K/W)		1,334		
	Valor U de superficie a superficie (W/m ² K)		0,859		
	Valor R (m ² K/W)		1,334		
	Valor U (W/m²K)		0,750		

Figura 8. Cálculos realizados por Design Builder, partiendo de los datos de la figura 6

Para la cubierta, se sigue el mismo proceso mostrado previamente, pero en este caso se modifica el espesor de la capa 4 (hollow brick) para variar el valor U de la cubierta.

Los valores de las infiltraciones y las ganancias internas que se introducen en Design Builder son las indicadas en el apartado 1.1, las cuales se irán variando mediante el script.

Se sigue el mismo proceso para las entradas de los valores del resto de variables, definiendo así cada escenario en Design Builder y ejecutando las simulaciones. Tal y como se ha mencionado previamente, mediante el script se modifica la información de entrada de cada caso, siendo este proceso automatizado y, por lo tanto, más rápido y eficiente.

5. RESULTADOS

Una vez ejecutadas las simulaciones, se obtienen los resultados de los 204.800 escenarios diferentes mencionados en formato Excel.

En este punto, el objetivo es identificar entre las variables las que más afectan en la demanda de calefacción o HED (Heating Energy Demand en inglés). En otras palabras, se busca determinar las modificaciones de qué variables supondrán mayor cambio en la demanda de calefacción.

En primer lugar, se analizará la afección de cada variable y finalmente se concluirá un ranking desde el que más afección tenga hasta el que menos.

5.1.1. Afección del tipo de edificio

Tal y como se muestra en la figura 9, se observa que la tipología en la que se da la mayor demanda energética de calefacción es en el edificio del tipo E, dándose un escenario con un máximo de 127,48 kWh/m²año. Sin embargo, la tipología H alta presenta los valores más reducidos, siendo su máximo 109,07 kWh/m²año, suponiendo una reducción del 14,45% en la demanda energética de calefacción.

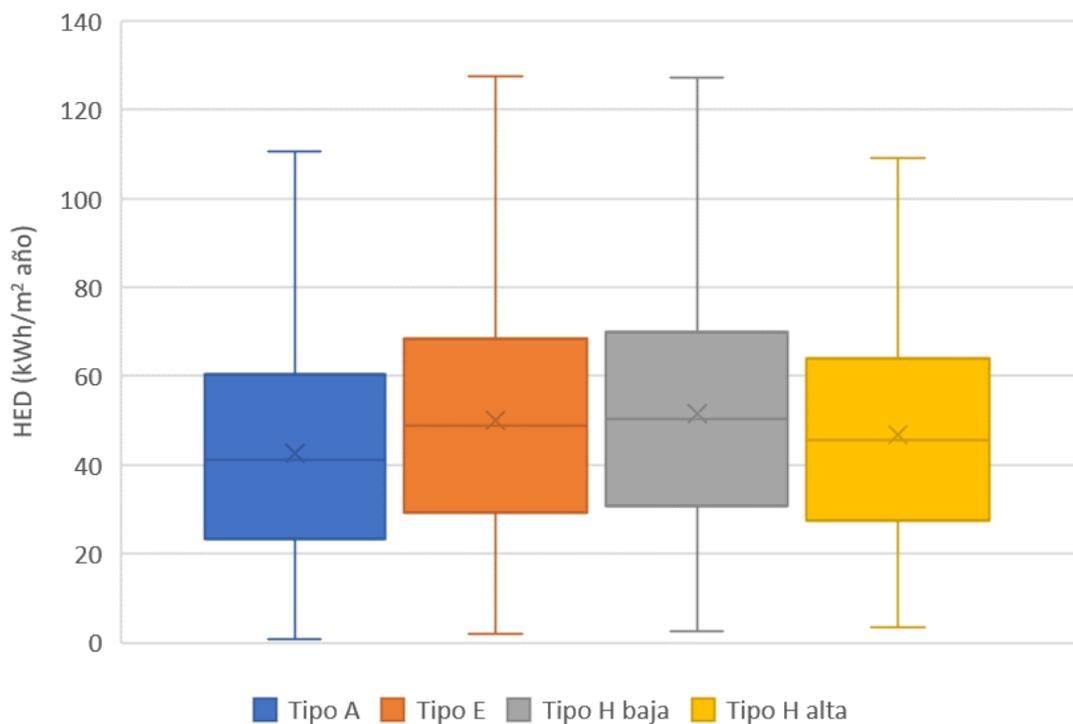


Figura 9. Demanda energética de calefacción en función de las diferentes tipologías de edificios

5.1.2. Afección del WWR y el tipo de ventanas

A continuación, se muestran las figuras 10, 11, 12 y 13, donde se representan las HED anuales en función de los diferentes valores de U de las ventanas y a su vez comparando los escenarios con WWR al 20% con los de WWR al 40%.

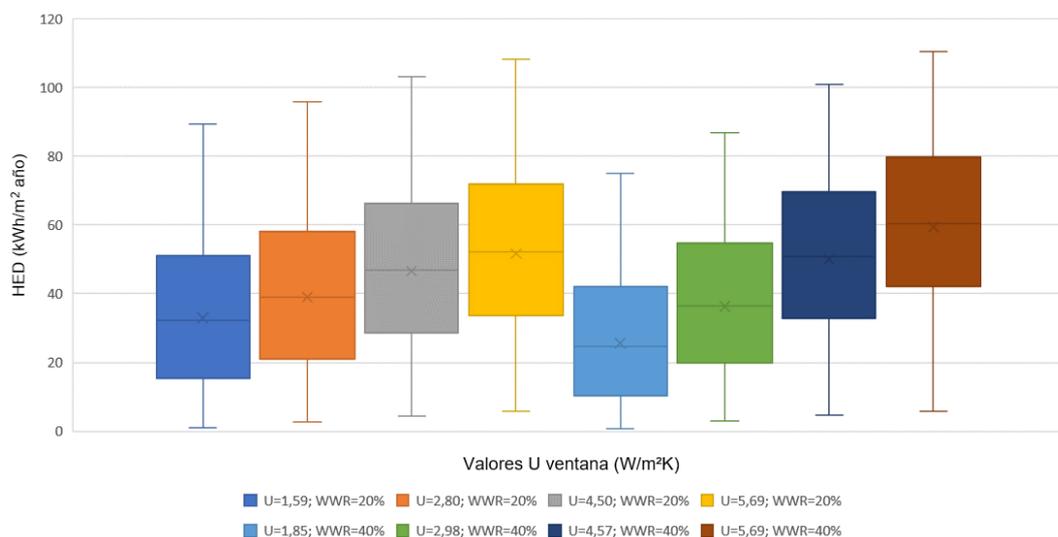


Figura 10. Demanda energética de calefacción en función de diferentes valores de U de ventana y WWR al 20% y al 40% en edificios tipo A

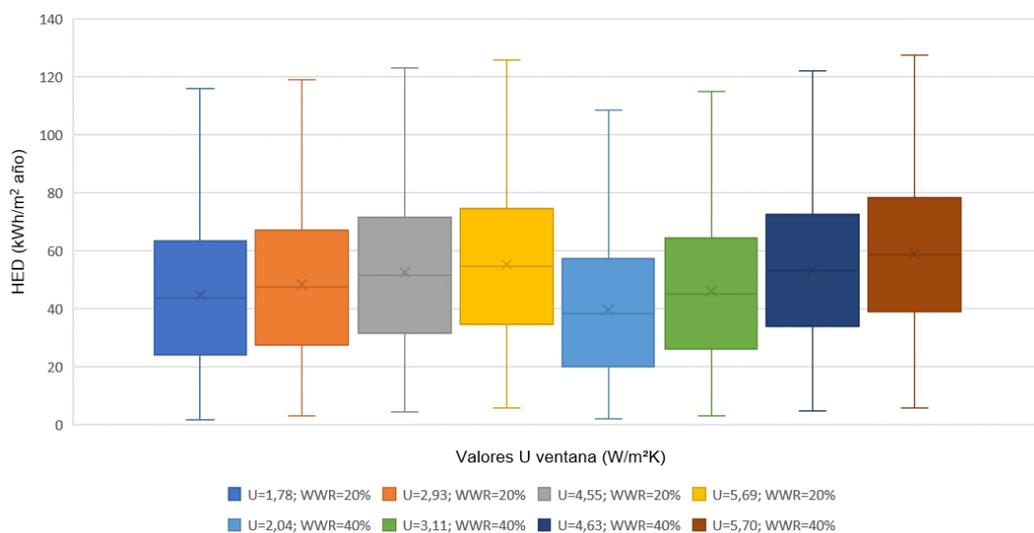


Figura 11. Demanda energética de calefacción en función de diferentes valores de U de ventana y WWR en edificios tipo E

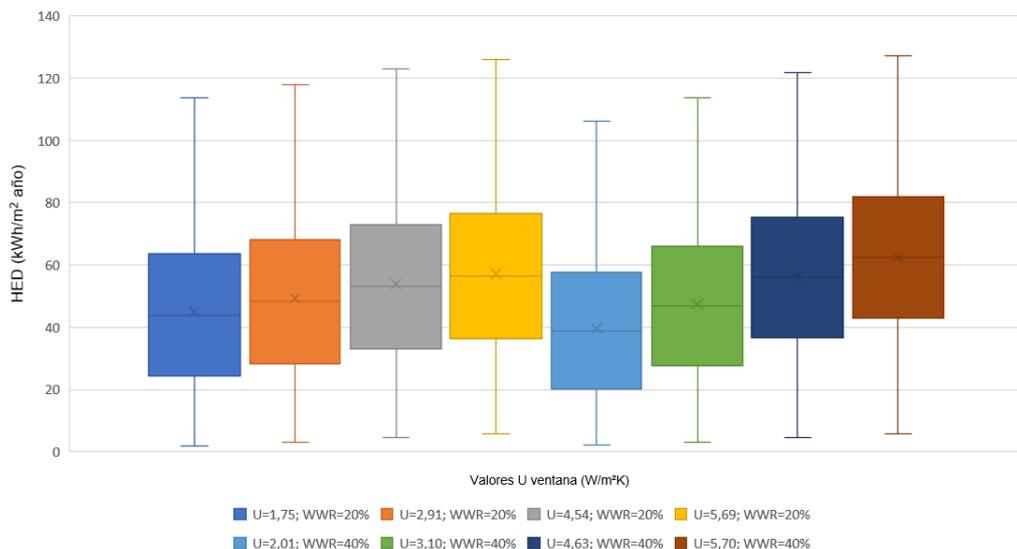


Figura 12. Demanda energética de calefacción en función de diferentes valores de U de ventana y WWR en edificios tipo H baja

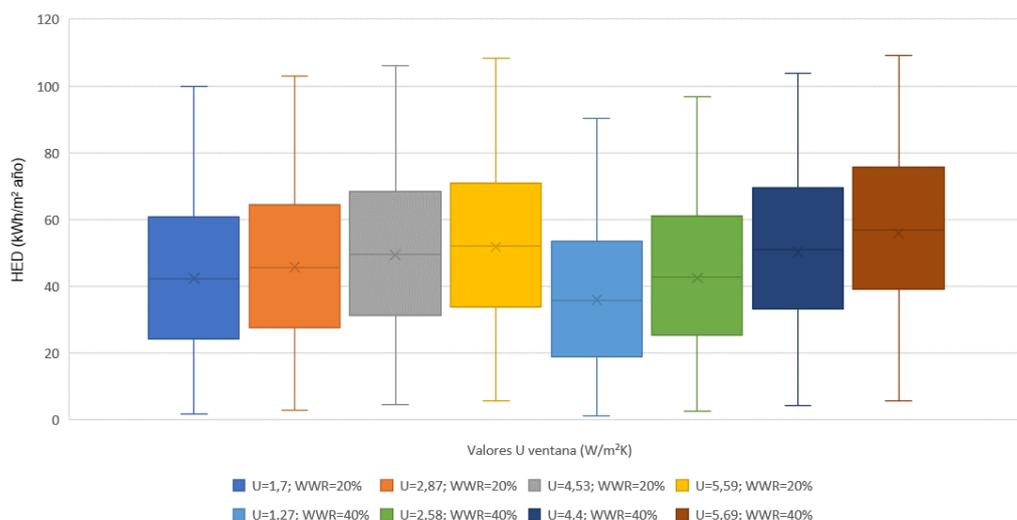


Figura 13. Demanda energética de calefacción en función de diferentes valores de U de ventana y WWR en edificios tipo H alta

Se puede observar que a mayor WWR, el aumento de la U de las ventanas afecta más pronunciadamente en el aumento de HED anual. Los datos muestran que con el WWR al 20%, el aumento de la U de ventana interfiere en mayor medida en los edificios de tipología A, aumentando hasta en un 17,26% el HED anual comparando la U de 1,7 W/m² K con la U de 5,69 W/m² K.

Con el WWR al 40%, es en la tipología A donde también se da el mayor aumento de HED, siendo en un 32,16 % comparando el menor valor de U con el mayor.

5.1.3. Afección de la orientación

En la figura 14 se representan las máximas HED anuales, donde las variaciones respecto a los máximos que se dan con la orientación a 0º son menores que en las variaciones de las variables anteriores:

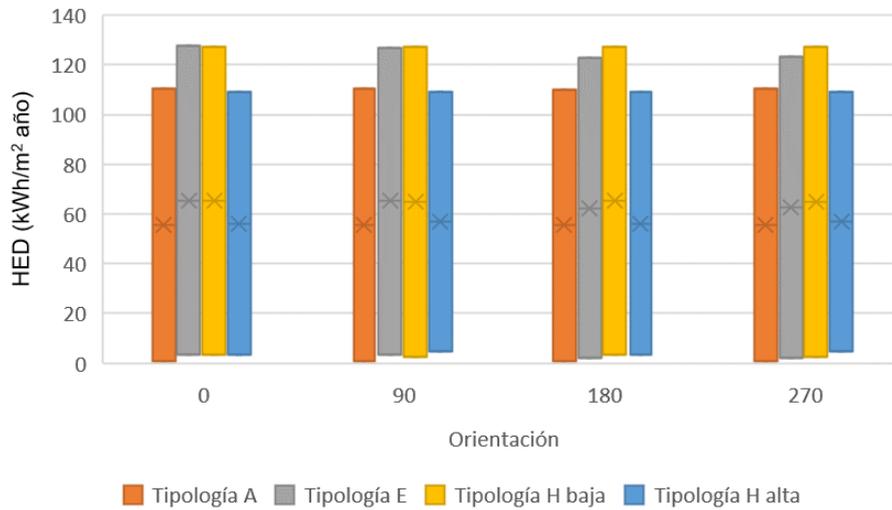


Figura 14. Demanda energética de calefacción en función de diferentes orientaciones para cada tipología

Se observa en la gráfica que la mayor variación del máximo HED corresponde al caso de la orientación de 180º en la tipología E, siendo un 4,01% de reducción respecto al valor en posición de 0º.

5.1.4. Afección del aislante de la fachada

En este apartado se ha analizado la afección de la variación del aislante de la fachada, separando los escenarios en WWR=20% y los escenarios en 40%, ya que el porcentaje de área no acristalada será diferente (que a su vez se trata del área de la fachada cuyas propiedades se están variando).

En la figura 15 se representan las HED en función de la variación del espesor del aislante de la fachada (directamente relacionado con la transmitancia térmica) para WWR=20%:

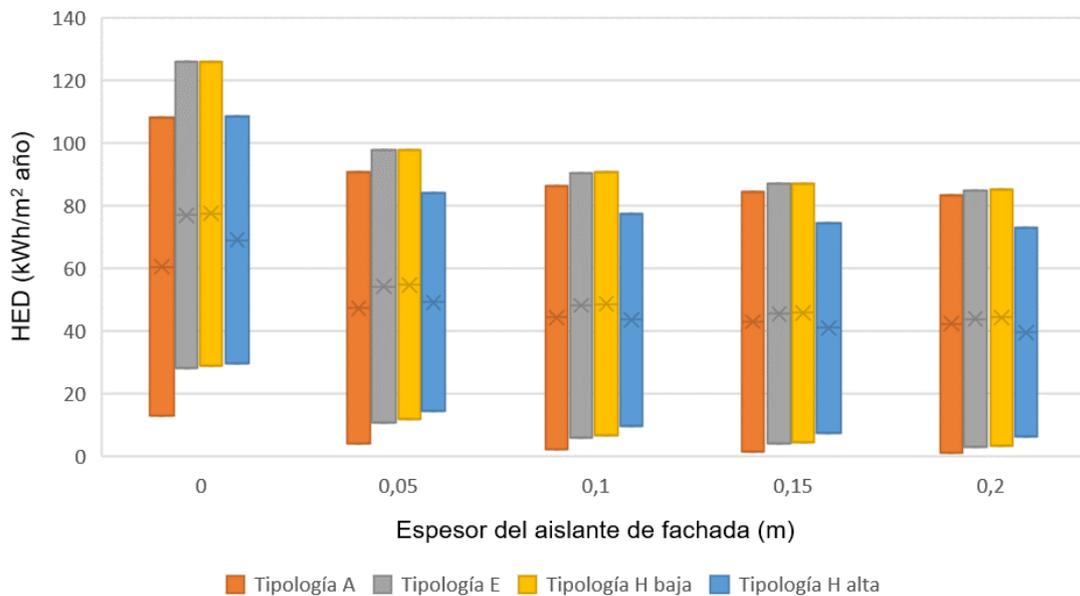


Figura 15. Demanda energética de calefacción en función de diferentes espesores de aislante de fachada para para cada tipología (WWR=20%)

Puede observarse que la variación del aislante de fachada en WWR=20% afecta en mayor medida a la HED de los edificios del tipo H alta (32,8% de reducción del HED con 0,2 m de aislante frente a 0 m de aislante).

Debe destacarse que los edificios del tipo A perciben una reducción menos significativa (23,10%), pero las otras dos tipologías presentan números muy similares al mencionado de la tipología H alta.

En la figura 16 se repite el proceso previo, pero esta vez usando un WWR=40%:

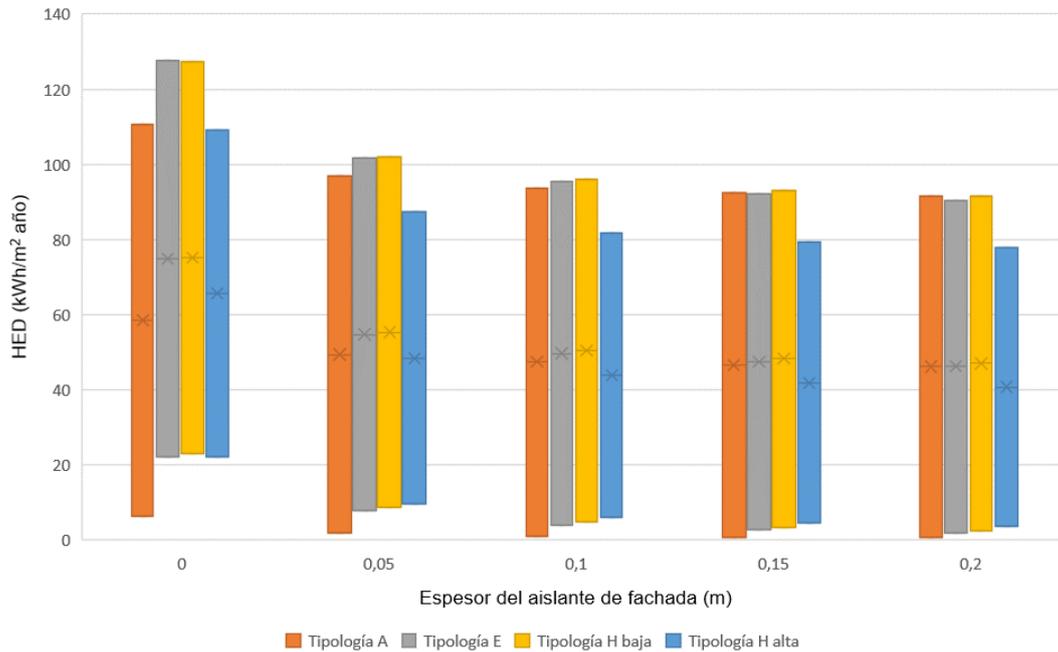


Figura 16. Demanda energética de calefacción en función de diferentes espesores de aislante de fachada para cada tipología (WWR=40%)

En este caso, los datos muestran que la variación del aislante de la fachada es más sensible para la HED en los edificios de tipología E (reducción del 29% con 0,2 m de aislante frente a 0 m).

Al igual que con el WWR=20%, los edificios de tipología A muestran una menor sensibilidad (17,3% comparando el mayor espesor de aislante con el menor) y el resto de tipologías muestran valores cercanos al 29%.

5.1.5. Afección del aislante de la cubierta

Variando el espesor del aislante de la cubierta (y por lo tanto, el valor de U), la figura 17 muestra que en las tipologías A y H alta, la reducción de las máximas HED se ven ligeramente más acentuadas, pero la diferencia frente al resto de tipologías no resulta demasiado significativa (3,4% de reducción del HED con el máximo espesor de aislante comparado al valor mínimo, frente a 2,8-2,9% en el resto de tipologías).

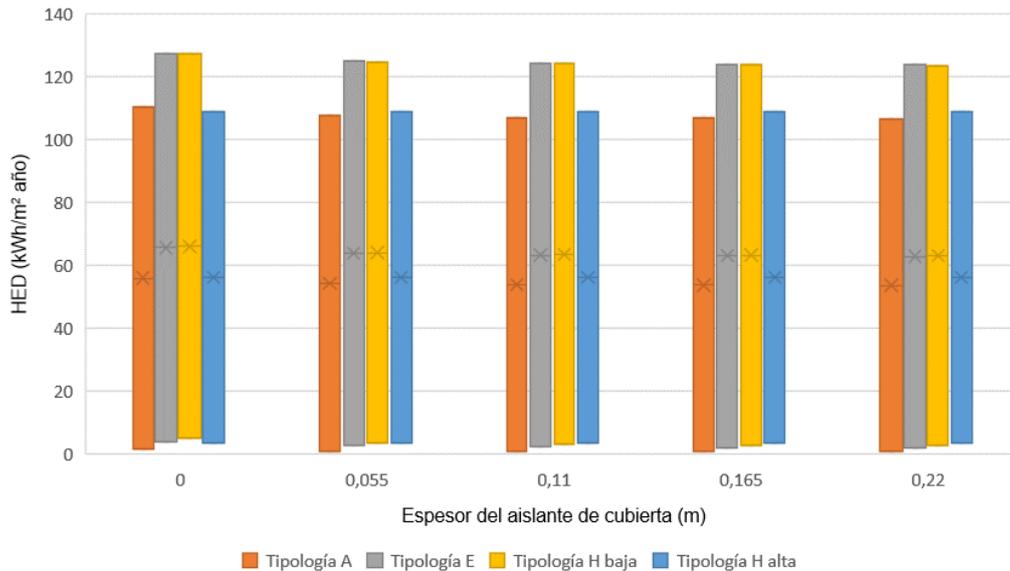


Figura 17. Demanda energética de calefacción en función de diferentes espesores de aislante de cubierta para cada tipología

5.1.6. Afección de la capa de inercia térmica

La siguiente figura 18 muestra la reducción de HED anual en función del aumento del espesor de la capa de inercia térmica en las diferentes tipologías de edificios:

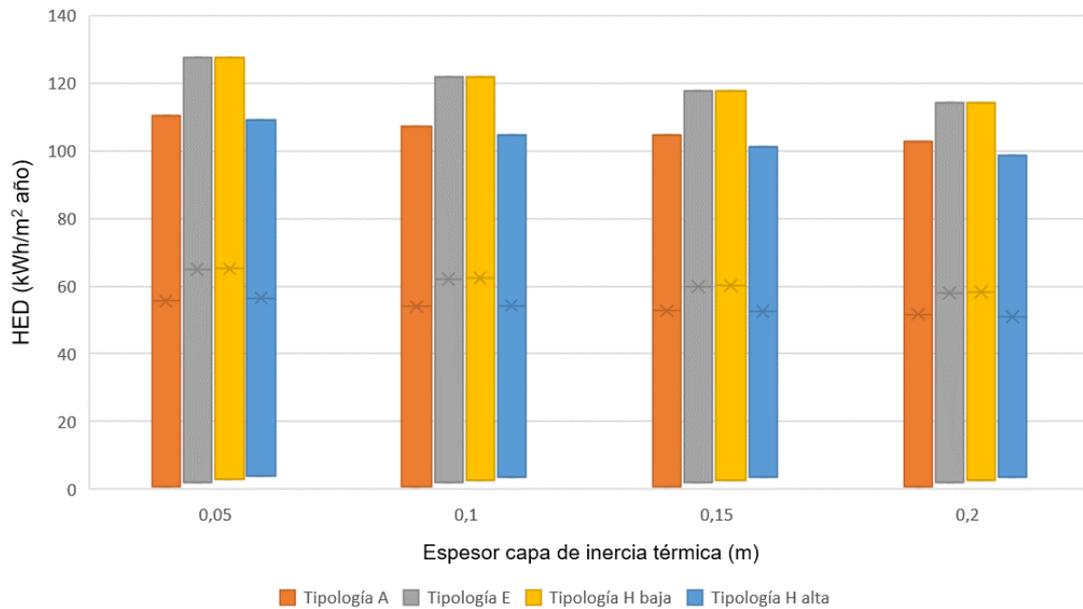


Figura 18. Demanda energética de calefacción en función de diferentes espesores de capa de inercia térmica para cada tipología

Se observa que la máxima reducción del HED comparando el máximo espesor de la capa de inercia térmica frente al mínimo se da en la tipología E (10,6% de reducción), siendo un valor muy similar presentado en las demás tipologías.

5.1.7. Afección de las infiltraciones

La siguiente figura 19 muestra el aumento de HED anual en función del aumento de las infiltraciones en las diferentes tipologías de edificios:

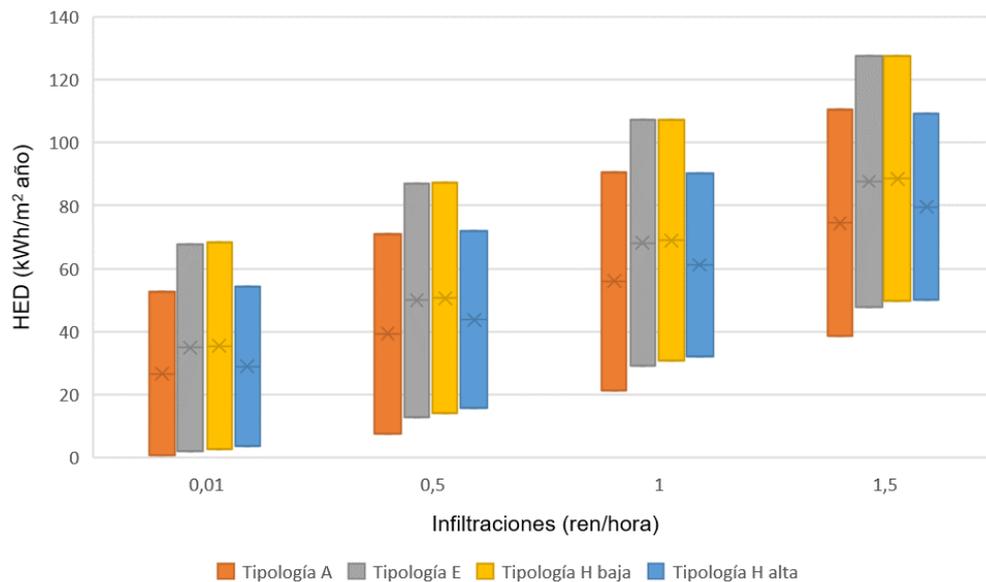


Figura 19. Demanda energética de calefacción en función del aumento de infiltraciones para cada tipología

La variable de las infiltraciones muestra una afección notable en la HED anual, dándose casos del aumento de entorno al 50% frente a situaciones sin infiltraciones. Cabe destacar que las cuatro tipologías presentan valores muy similares, siendo la tipología A la que mayor sensibilidad muestra (52,8% de aumento).

5.1.8. Afección de las ganancias internas

En la figura 20 se muestra la disminución de la HED frente al aumento de las ganancias internas en las diferentes tipologías de edificios:

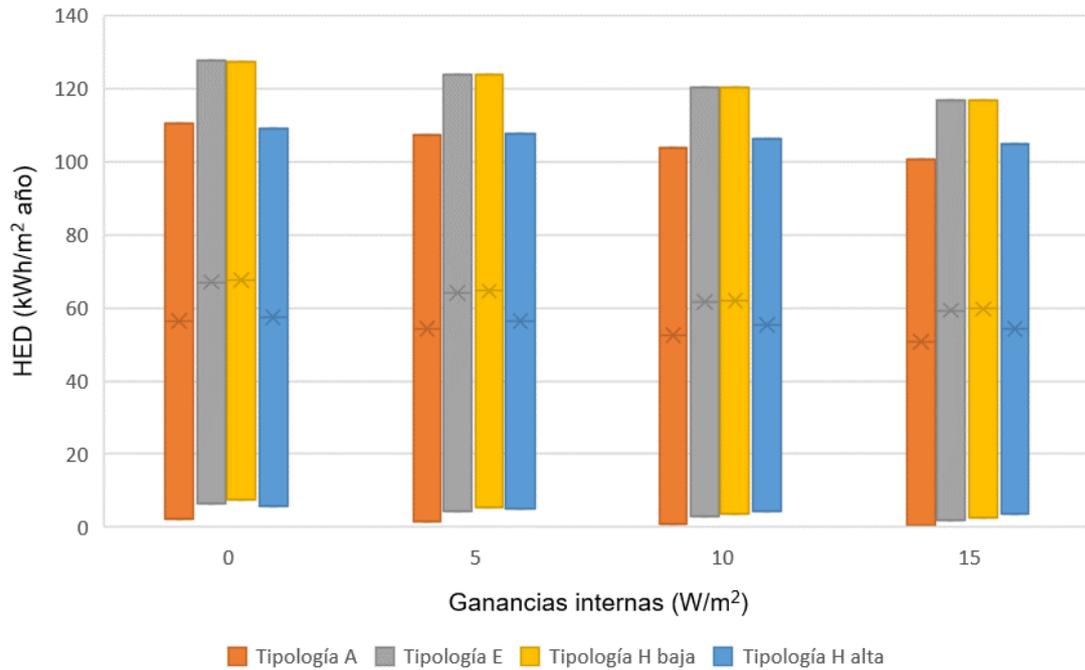


Figura 20. Demanda energética de calefacción en función de diferentes ganancias internas para cada tipología

Con ganancias internas de 15 W/m² se observan reducciones de la HED de entre 3,9% y 8,9% frente a escenarios sin ganancias internas, siendo en la tipología A donde se da la mayor reducción y en la H alta en la que se da la menor.

6. CONCLUSIONES FINALES

El análisis de los resultados muestra una clara diferencia en la afección de las diferentes variables en la demanda energética de calefacción (HED) anual.

Se ha podido observar la afección de cada variable de una forma cuantitativa, pudiendo determinar mediante porcentajes el grado de afección de la variación de cada una de ellas en la HED final.

Siendo el objetivo de este estudio el identificar el grado de afección de cada variable en la demanda energética de calefacción anual del edificio, se presenta la siguiente figura 21 donde se pueden observar las variaciones máximas que se han dado y, por lo tanto, identificar las variables más influyentes en la HED final:

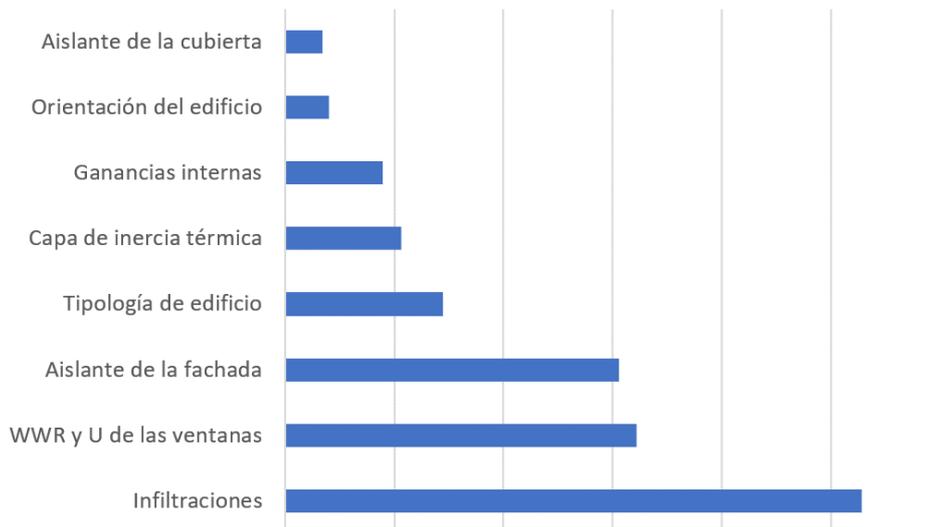


Figura 21. Grado de afección de la variación de las variables identificadas en la demanda energética de calefacción en los edificios de Otxarkoaga

Con los 204.800 escenarios analizados, se concluye que las variables que más afectan en la demanda energética de calefacción son la las infiltraciones del edificio, seguidas por la WWR, el tipo de ventanas con diferentes valores de U y la transmitancia térmica de los muros de la fachada.

Por lo tanto, debe remarcar la importancia de las pérdidas de calor mediante las infiltraciones de aire, ya que su afección supera por mucho a la del resto de variables. Respecto al WWR y el valor U de las ventanas, se puede señalar que el WWR juega un papel importante, ya que aumentando el WWR para las mismas ventanas, el aumento de la HED también se ve afectado

a mayor. Además, se ha observado la notable reducción en la HED con las variaciones de la transmitancia térmica de los muros de la fachada.

En cuanto a la capa de inercia térmica, se ha podido determinar que la afección no es tan grande comparada con el resto de variables, pero junto con el aislamiento de cubierta, fomentar la aplicación de capas de baja transmitancia térmica podrá aportar futuros ahorros energéticos, a pesar de que sean menores que los ahorros que aportarían las mejoras en la fachada o en las ventanas.

En cuanto a la tipología de los edificios, según los resultados, debe destacarse en primer lugar que los edificios de la tipología H alta presentan de por sí una demanda menor que el resto de tipologías. Una hipótesis es que, al tener mayor número de plantas, la inercia térmica del edificio será mayor. Además, frente al volumen total del edificio, las renovaciones de aire serán proporcionalmente más disminuidas que en el resto del edificio, con lo que las pérdidas de calor serán menores. Aunque tal y como se ha dicho, se trata de una hipótesis y estas afirmaciones no están comprobadas.

Por último, la orientación y las ganancias internas muestran ahorros menores, pero en este punto se puede señalar que orientar la fachada principal hacia el sur harán que las ganancias de calor mediante la radiación solar sean mayores en épocas frías, con lo que podría darse un pequeño ahorro en la calefacción para llegar al mismo confort térmico.

Después de conocer los resultados del presente proyecto con las tendencias mostradas, como futuras líneas de trabajo se pueden proponer las propuestas de rehabilitaciones energéticas en las fachadas de los edificios más demandantes de energía de calefacción, o incluso el diseñar una rehabilitación energética para cada tipo de edificio partiendo de los resultados mostrados en este proyecto (actualmente se pueden concluir las carencias de cada tipología según las simulaciones realizadas).

Sin embargo, también resultaría interesante poder realizar las simulaciones con valores reales o medidos de las variables seleccionadas, por lo que otra posible línea de estudio podría ser el estudio de las posibles formas de obtener dichos datos reales (bases de datos, mediciones in situ, etc.).

7. REFERENCIAS

- [1] H. Y. J. C. L. Liu Yang, Thermal comfort and building energy consumption implications – A review, vol. 115, 2014, pp. 164-173.
- [2] Luis Pérez-Lombard, José Ortiz, Christine Pout, «A review on buildings energy consumption information,» 2008.
- [3] M. G. Portilla, «Los orígenes de una metrópoli industrial: la Ría de Bilbao,» *Revista de Historia Industrial*, pp. 215-217, 2002.
- [4] J. A. P. Pérez, «La transformación del mundo laboral en el área industrial del Gran Bilbao 1958-1977. Una visión histórica del desarrollismo,» *Scripta Nova, Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, Universidad de Barcelona, Universidad de Barcelona, 2022.
- [5] EHU/UPV, «ehu.eus,» [En línea]. Available: <https://www.ehu.eus/es/web/enedi/grupo-enedi>. [Último acceso: 24 Junio 2022].
- [6] M. Álvarez Sanz, «Desarrollo de modelos simples para la estimación de la demanda de calefacción en edificios,» Bilbao, 2020.
- [7] A. Pastor , F. García-Alonso, J. A. Reyes y Y. Villacampa, «Analysis of the determining parameters of energy efficiency on residential buildings in the Mediterranean climate,» 2011. [En línea].
- [8] J. Lopez Villada, «Integración de sistemas de refrigeración solar en redes de distrito de frío y de calor,» Tarragona, 2010.
- [9] P. & A. R. & P. M. & P. L. & B. M. & M. A. & K. J. & R. C. & F. Zangheri, «Heating and cooling energy demand and loads for building types in different countries of the EU,» 2014.
- [10] Guohui Feng, Baoyue Dou, Xiaolong Xu, Dandan Chi, Yixin Sun, Peiyu Hou, «Research on Energy Efficiency Design Key Parameters of Envelope for Nearly Zero Energy Buildings in Cold Area,» 2017.
- [11] F. F. D. P. A. S. A. C. Siliang Yang, «A sensitivity analysis of design parameters of BIPV/T-DSF in relation to building energy and thermal comfort performances,» 2021.
- [12] T. & T. C. & A. Z. & G. A. G. Coşkun, «The Importance of Internal Heat Gains for Building Cooling Design,» *Journal of Thermal Engineering*, 2017.

- [13] J. Ferdyn-Grygierek y A. Baranowski, «Energy demand in the office buildings for various internal heat gains,» 2011.
- [14] F. Ziegler, «Internal heat gains in residential buildings in Germany,» 2020.
- [15] A. A. Stijn Verbeke, «Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use,» 2018.
- [16] K. Bataineh, A. Al Rabee, «Design Optimization of Energy Efficient Residential Buildings in Mediterranean Region,» 2022.
- [17] Y. Sun, «Sensitivity analysis of macro-parameters in the system design of net zero energy building,» 2015.
- [18] Liqiang Hou, Yan Liu, Liu Yang, Jiang Liu, Yuhao Qiao, «The Impacts of Energy Efficiency Design Parameters on Office Buildings Energy Consumption in Different Climate Zones in China,» 2017.
- [19] L. Z. L. Z. G. B. Sisi Chen, «A rapid evaluation method for design strategies of high-rise office buildings achieving nearly zero energy in Guangzhou,» 2021.
- [20] Causone, Francesco & Carlucci, Salvatore & Pagliano, Lorenzo & Pietrobon, Marco, «A Zero Energy Concept Building for the Mediterranean Climate,» 2014.
- [21] S. W. H. C. Hangxin Li, «Sensitivity analysis of design parameters and optimal design for zero/low energy buildings in subtropical regions,» 2018.
- [22] F. J. C. P. V. P. A. a. G. A. G. G. Miguel Ángel Mellado Mascaraque, «Evaluation of the Thermal Comfort and Energy Demand in a Building with Rammed Earth Walls in Spain: Influence of the Use of In Situ Measured Thermal Conductivity and Estimated Values,» Castilla-La Mancha, 2021.
- [23] Jian Yao, Youxian Huang, Kaixiang Cheng, «Coupling effect of building design variables on building energy performance,» 2021.
- [24] Roman Loeffler, Doris Österreicher, Gernot Stoeglehner, «The energy implications of urban morphology from an urban planning perspective – A case study for a new urban development area in the city of Vienna,» 2021.
- [25] H. S. S. Daeung Danny Kim, «Heating and cooling energy consumption prediction model for high-rise apartment buildings considering design parameters,» 2021.
- [26] R. Elsland, «Analysing the Contribution of Internal Heat Gains When Evaluating the Thermal Performance of Buildings,» 2017.

- [27] S. G.-L. , G.-P. , L. M.-G. J. S.-P. Marta Monzón-Chavarrías, «Heating Energy Consumption and Environmental Implications Due to the Change in Daily Habits in Residential Buildings Derived from COVID-19 Crisis: The Case of Barcelona, Spain,» MDPI, 2021.
- [28] S. B. M. F. P. E. B. K. J. R. S. Iakovos T. Michailidis, «Proactive control for solar energy exploitation: A german high-inertia building case study,» 2015.
- [29] W. W. H. Z. G. W. a. Y. T. Xiaodong Liu, «Research on Optimization of Regional Integrated Energy System Based on Thermal Inertia of Building Clusters,» 2022.
- [30] J. & B. A. Ferdyn-Grygierek, «Impact of the internal heat gains on the prediction of the seasonal heat consumption in building,» 2011.
- [31] M. P. V. Ž. L. Damjan Maučec, «Use of sensitivity analysis for a determination of dominant design parameters affecting energy efficiency of timber buildings in different climates,» 2021.
- [32] Waqas Ahmed Mahar, Griet Verbeeck, Sigrid Reiter and Shady Attia, «Sensitivity Analysis of Passive Design Strategies for Residential Buildings in Cold Semi-Arid Climates,» 2020.
- [33] L. Urien Berrostegetia, «Estrategias de rehabilitación energética coste-eficientes a escala de distrito combinando eficiencia energética y renovables,» Bilbao, 2020.
- [34] M. H. Sherman, «Air infiltration in buildings,» Universidad de California, Berkeley, 1980.
- [35] T. & T. C. & A. Z. & G. A. G. oşkun, «The Importance of Internal Heat Gains for Building Cooling Design,» 2017.
- [36] P. Serrano Yuste, «Certificados Energéticos,» 20 Diciembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.certificadosenergeticos.com/inercia-termica-construccion-edificios-eficientes>.
- [37] Ministerio de Fomento, «Cálculo de parámetros característicos de la envolvente,» 2020.
- [38] V. I. a. B. C. T. Catalina, «Multiple regression model for fast prediction of the heating energy demand,» vol. 57, pp. 302-312, 2021.
- [39] J. L. Morote Salmeron, «OVACEN,» [En línea]. Available: <https://ovacen.com/programas-para-la-simulacion-energetica-de-edificios/>. [Último acceso: 16 Mayo 2022].
- [40] Econova, «Econova,» 2020. [En línea]. Available: <https://econova-institute.com/blog/software-para-la-simulacion-energetica/>. [Último acceso: 16 Mayo 2022].

[41] F. J. C. P. V. P. A. a. G. A. G. G. Miguel Ángel Mellado Mascaraque, «Evaluation of the Thermal Comfort and Energy Demand in a building with Rammed Earth Walls in Spain: Influence of the use of In Situ Measured Thermal Conductivity and Estimated Values,» Castilla-La Mancha, 2021.

[42] Google, «Google Earth,» 2022. [En línea]. Available: <https://earth.google.com/web>.