

D3. Evaluación del ahorro energético asociado a la aplicación de las medidas de mejora energética

Número de documento	D3
Título del documento	Evaluación del ahorro energético asociado a la aplicación de las medidas de mejora energética
Versión	1.0
Estado	Final
Tarea	T3. Evaluación del ahorro energético asociado a la aplicación de cada medida de mejora para cada una de las tipologías edificatorias identificadas
Tipo de entregable	Informe
Fecha de entrega	06/09/2019
Autores	Dra. Marta Gangoells y Dr. Miquel Casals
Colaboradores	Ariadna Puig Engel y Jaume Ferré Bigorra
Palabras clave	Oficinas, medidas de eficiencia energética, rehabilitación energética
Nivel de diseminación	Público



Resumen ejecutivo

Este informe representa el hito número 3 del proyecto de investigación *EOFF - Soluciones individualizadas ambientalmente y económicamente sostenibles para la rehabilitación energética del parque de edificios de oficinas* (BIA2016-75382-R), financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad a través Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad. El objetivo general de este proyecto es el desarrollo de un modelo integrado para la determinación de la solución óptima de rehabilitación energética del parque de edificios de oficinas, teniendo en cuenta las repercusiones energéticas, económicas y ambientales asociadas a diferentes medidas de mejora y particularizadas a las características del edificio objeto de análisis. Este informe describe el resultado de los trabajos realizados en el marco de la *Tarea 3 - Evaluación del ahorro energético asociado a la aplicación de cada medida de mejora para cada una de las tipologías edificatorias identificadas*. En este documento se adjunta la metodología seguida para la obtención del ahorro energético asociado a la aplicación de las medidas de mejora identificadas en la Tarea 2 de este proyecto. La clasificación por tipologías edificatorias de referencia se ha repetido mediante una nueva aproximación que resulta en un número menor de ellas. Además, se incluyen las características técnicas de las medidas de rehabilitación necesarias para realizar las simulaciones, cuyos resultados se muestran y analizan.



Tabla de contenidos

1. INTRODUCCIÓN	9
2. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL AHORRO ENERGÉTICO	9
3. EDIFICIOS DE REFERENCIA	10
3.1 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LOS EDIFICIOS DE REFERENCIA	11
3.2 PRESELECCIÓN DE VARIABLES	11
3.3 PREPARACIÓN DE LOS DATOS	12
3.4 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN	13
3.5 VALIDEZ Y NÚMERO ÓPTIMO DE CLÚSTERES	15
3.6 OBTENCIÓN DE LOS EDIFICIOS DE REFERENCIA TEÓRICOS	18
3.7 ANÁLISIS DE LA REPRESENTATIVIDAD DE LOS CLÚSTERES	20
3.8 OBTENCIÓN DE LOS EDIFICIOS DE REFERENCIA REALES	21
4. MEDIDAS DE REHABILITACIÓN ENERGÉTICA	24
4.1 MEDIDAS PRIMARIAS	25
4.2 MEDIDAS SECUNDARIAS	28
4.3 MEDIDAS TERCIARIAS	29
4.4 PAQUETES DE MEDIDAS	30
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	31
5.1 BLOQUES DE OFICINAS Y OFICINAS EN NAVES INDUSTRIALES	31
5.1.1 Oficina de referencia B1	31
5.1.2 Oficina de referencia B2	32
5.1.3 Oficina de referencia B3	33
5.1.4 Oficina de referencia B4	34
5.1.5 Oficina de referencia B5	35
5.1.6 Oficina de referencia B6	37
5.1.7 Oficina de referencia B7	38
5.1.8 Resumen de los resultados	39
5.2 OFICINAS EN EDIFICIOS RESIDENCIALES	40
5.2.1 Oficina de referencia R1	41
5.2.2 Oficina de referencia R2	42
5.2.3 Oficina de referencia R3	42
5.2.4 Oficina de referencia R4	43
5.2.5 Oficina de referencia R5	44
5.2.6 Oficina de referencia R6	45



5.2.7	Oficina de referencia R7	46
5.2.8	Oficina de referencia R8	47
5.2.9	Oficina de referencia R9	47
5.2.10	Resumen de los resultados	49
6.	CONCLUSIONES	50
7.	REFERENCIAS	50

Figuras

Figura 1. Metodología para la obtención del ahorro energético.....	9
Figura 2. Metodología seguida para el clustering por “k-means”.....	11
Figura 3. Gráfico de validez del clustering a partir del índice RMSSTD para las oficinas de bloque y oficinas en edificios industriales.	16
Figura 4. Gráfico de validez del clustering a partir del índice RMSSTD para las oficinas en edificios residenciales.	17
Figura 5. Representatividad de los clústeres dentro de la tipología constructiva de bloques de oficinas y oficinas en edificios industriales.	20
Figura 6. Representatividad de los clústeres dentro de la tipología constructiva de oficinas en edificios residenciales.	20

Nota: Todas las figuras son de elaboración propia excepto cuando se indica lo contrario.

Tablas

Tabla 1. Proporción de número de certificados para cada tipología constructiva.....	13
Tabla 2. Coeficientes de regresión de las variables significativas obtenidos en la segunda iteración para el subconjunto de datos incluyendo bloques de oficinas y oficinas en edificios industriales.	14
Tabla 3. Coeficientes de regresión de las variables significativas obtenidos en la segunda iteración para el subconjunto de datos de oficinas en edificios residenciales.	15
Tabla 4. Características de los edificios de referencia teóricos para bloques de oficinas y oficinas en naves industriales.	18
Tabla 5. Características de los edificios de referencia teóricos para oficinas en edificios residenciales.....	19
Tabla 6. Características de los edificios de referencia reales para bloques de oficinas y oficinas en naves industriales.	22
Tabla 7. Características de los edificios de referencia reales para oficinas en edificios residenciales.....	23
Tabla 8. Aplicabilidad de las medidas de rehabilitación según la tipología edificatoria.....	24
Tabla 9. Características técnicas de las medidas de aislamiento de fachada y cubierta.	26
Tabla 10. Características técnicas de las medidas de intervención sobre los huecos.	26
Tabla 11. Características técnicas de las medidas de colocación de protecciones solares.	27
Tabla 12. Características técnicas de las medidas de mejora de la estanqueidad.....	27
Tabla 13. Características técnicas de las medidas de renovación e instalación de bomba de calor.....	28
Tabla 14. Características técnicas de las medidas de sustitución de lámparas.....	28
Tabla 15. Ahorro energético asociado a la renovación del ascensor por uno de última generación.....	29
Tabla 16. Resultados de los proyectos de desarrollo de juegos serios en el contexto de Horizon 2020 EU.3.3.1. de la Comisión Europea.....	29



Tabla 17. Ahorro energético asociado a la instalación de sistemas de gestión y control a la oficina y de la concienciación de los usuarios.	30
Tabla 18. Características de los paquetes de mejora.	30
Tabla 21. Resumen de equipos de climatización de la oficina B5.	33
Tabla 23. Resumen de equipos de climatización de la oficina B7.	34
Tabla 21. Resumen de equipos de climatización de la oficina B5.	36
Tabla 22. Resumen de equipos de climatización de la oficina B6.	37
Tabla 23. Resumen de equipos de climatización de la oficina B7.	38
Tabla 24. Resumen de ahorros energéticos en kWh/m ² ·año según medida de mejora energética y oficina representativa para el caso de bloques de oficinas y oficinas en edificios industriales.	40
Tabla 23. Resumen de equipos de climatización de la oficina R1.	41
Tabla 23. Resumen de equipos de climatización de la oficina R3.	43
Tabla 23. Resumen de equipos de climatización de la oficina R4.	44
Tabla 23. Resumen de equipos de climatización de la oficina R5.	44
Tabla 23. Resumen de equipos de climatización de la oficina R6.	45
Tabla 23. Resumen de equipos de climatización de la oficina R7.	46
Tabla 23. Resumen de equipos de climatización de la oficina R8.	47
Tabla 23. Resumen de equipos de climatización de la oficina R9.	48
Tabla 24. Resumen de ahorros energéticos en kWh/m ² ·año según medida de mejora energética y oficina representativa para el caso de oficinas en edificios residenciales.	50

Nota: Todas las tablas son de elaboración propia excepto cuando se indica lo contrario.



EOFF

*Soluciones individualizadas
ambientalmente y económicamente sostenibles
para la rehabilitación energética
del parque de edificios de oficinas*

D3. Evaluación del ahorro energético asociado a la aplicación de las medidas de mejora energética

Glosario y abreviaciones

HULC	Herramienta Unificada Lider Calener
CE3X	Documento Reconocido para la Certificación Energética de Edificios Existentes
ICAEN	Institut Català de l'Energia
KNIME	Konstanz Information Miner
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences

1. Introducción

El objetivo final de este documento es la evaluación, para cada una de las tipologías edificatorias de referencia, del ahorro energético asociado a cada medida de mejora o paquetes de medidas de mejora de la eficiencia energética. La metodología seguida para la evaluación del ahorro energético se detalla en el apartado 2.

El tercer apartado incluye una nueva segmentación de los edificios de oficinas siguiendo el método de clustering “*k*-means”. En éste, se describe la metodología seguida y se recopila la información sobre las condiciones iniciales (incluyendo características constructivas, combustibles utilizados para distintos usos, zona climática...) de cada uno de los edificios de referencia que se estudiarán.

El apartado 4 resume las características técnicas de cada medida de rehabilitación, requeridas para llevar a cabo la simulación energética de la implementación de las medidas de mejora en los programas de certificación energética y así evaluar el comportamiento energético del edificio.

Finalmente, en el último apartado se presentan y analizan los resultados obtenidos al aplicar las medidas de rehabilitación en cada edificio de referencia, cuya simulación se ha realizado con programas de certificación energética.

2. Metodología para la evaluación del ahorro energético

La Figura 1 ilustra la metodología adoptada para la evaluación energética de las medidas de rehabilitación en los edificios de referencia. En primer lugar, se obtiene de cada edificio de referencia *i* las características energéticas del edificio base, para seguidamente obtener los resultados energéticos de aplicar cada una de las medidas *j*. El ahorro energético vendrá dado por la diferencia entre el consumo de energía final del edificio base *i*, y la del edificio *i* con cada medida *j* aplicada.

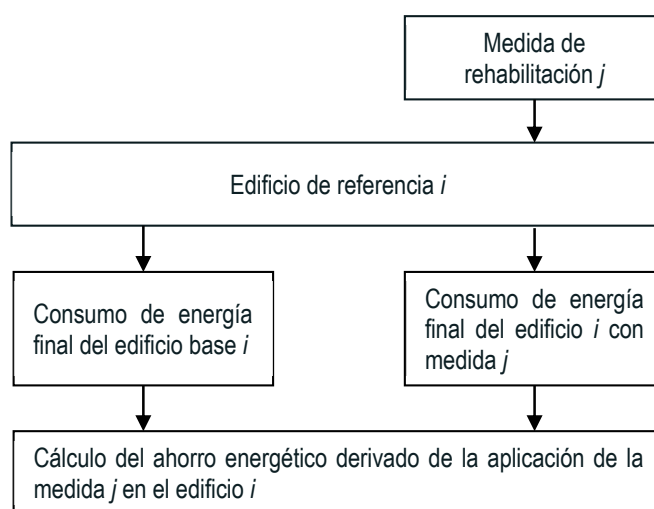


Figura 1. Metodología para la obtención del ahorro energético.

La evaluación del ahorro energético asociado a la aplicación de cada una de las medidas de rehabilitación en cada uno de los edificios de referencia se hará con los procedimientos de certificación energética facultados por el Ministerio de Fomento del Gobierno de España. En el caso de aplicación de medidas primarias, se obtendrá el ahorro energético analizando el consumo energético al aplicar cada una de las medidas. En aquellos edificios que no contenga sistemas o aparatos de climatización y por ende no se disponga de los consumos por calefacción y refrigeración, el ahorro energético se estimará a partir de la disminución de demanda energética. En el caso de aplicar medidas secundarias, que sí que afectan directamente al consumo energético, el ahorro energético se obtendrá en todos los casos a partir de los consumos de energía final de calefacción, refrigeración, ACS e iluminación.

Como se ha indicado, en ambos casos primero se analizará el edificio de referencia real al que llamaremos **edificio base**, y se anotará el comportamiento energético de este. Seguidamente se irán aplicando al edificio las distintas medidas en el programa correspondiente, obteniendo nuevos datos sobre el comportamiento energético que serán comparados con los del edificio base.

3. Edificios de referencia

La Tarea 1 de este proyecto resultó en la identificación de 324 tipologías de referencia de oficinas. Tras analizar los resultados, se determina que esta aproximación dificulta la obtención de resultados reales sobre el efecto de la implementación de las 58 medidas de rehabilitación en cada una de las tipologías edificatorias de referencia. El objetivo de este proyecto es efectuar dichas simulaciones a partir de certificados energéticos de edificios reales realizados con la Herramienta Unificada Lider Calener (HULC), un procedimiento más actualizado que el CE3X y que proporciona resultados más fiables, pues la introducción del edificio a evaluar y sus características es más completa. El principal impedimento es que la base de datos proporcionada por el ICAEN no contiene certificados HULC representativos para cada una de las 324 tipologías.

Por otro lado, aunque inicialmente se contemplaba este proyecto como un estudio sobre el comportamiento energético de los bloques de oficinas y oficinas en edificios industriales, una primera evaluación de los 13.706 certificados energéticos analizados proporcionados por el ICAEN evidencia que las oficinas en edificios residenciales conforman aproximadamente el 76% del total del parque de oficinas certificadas de Cataluña. Además, esta tipología edificatoria se certifica, en la mayoría de los casos, mediante el programa CE3X. Por esta razón, tal como se detalla en sub-apartados posteriores, se opta por ampliar el alcance de este proyecto evaluando estas dos tipologías constructivas por separado, usando el procedimiento HULC para los bloques de oficinas y oficinas en edificios industriales y el CE3X para las oficinas en edificios residenciales.

Teniendo todo esto en cuenta, se ha optado por proponer una nueva aproximación para la segmentación de los certificados energéticos mediante el método de clustering “*k*-means”. El concepto de agrupación en clústeres, comúnmente observado en los algoritmos de aprendizaje automático, tiene como objetivo la partición de un conjunto de *n* observaciones en *k* grupos o clústeres, en el que cada observación pertenece al clúster cuyo valor medio es más

cercano. Cada clúster viene determinado por un centroide que representa las características medias ponderadas de los edificios certificados pertenecientes a ese grupo.

3.1 Metodología para la obtención de los edificios de referencia

La Figura 2 resume la metodología para la segmentación de los edificios certificados proporcionados por el ICAEN de acuerdo el método “k-means”.

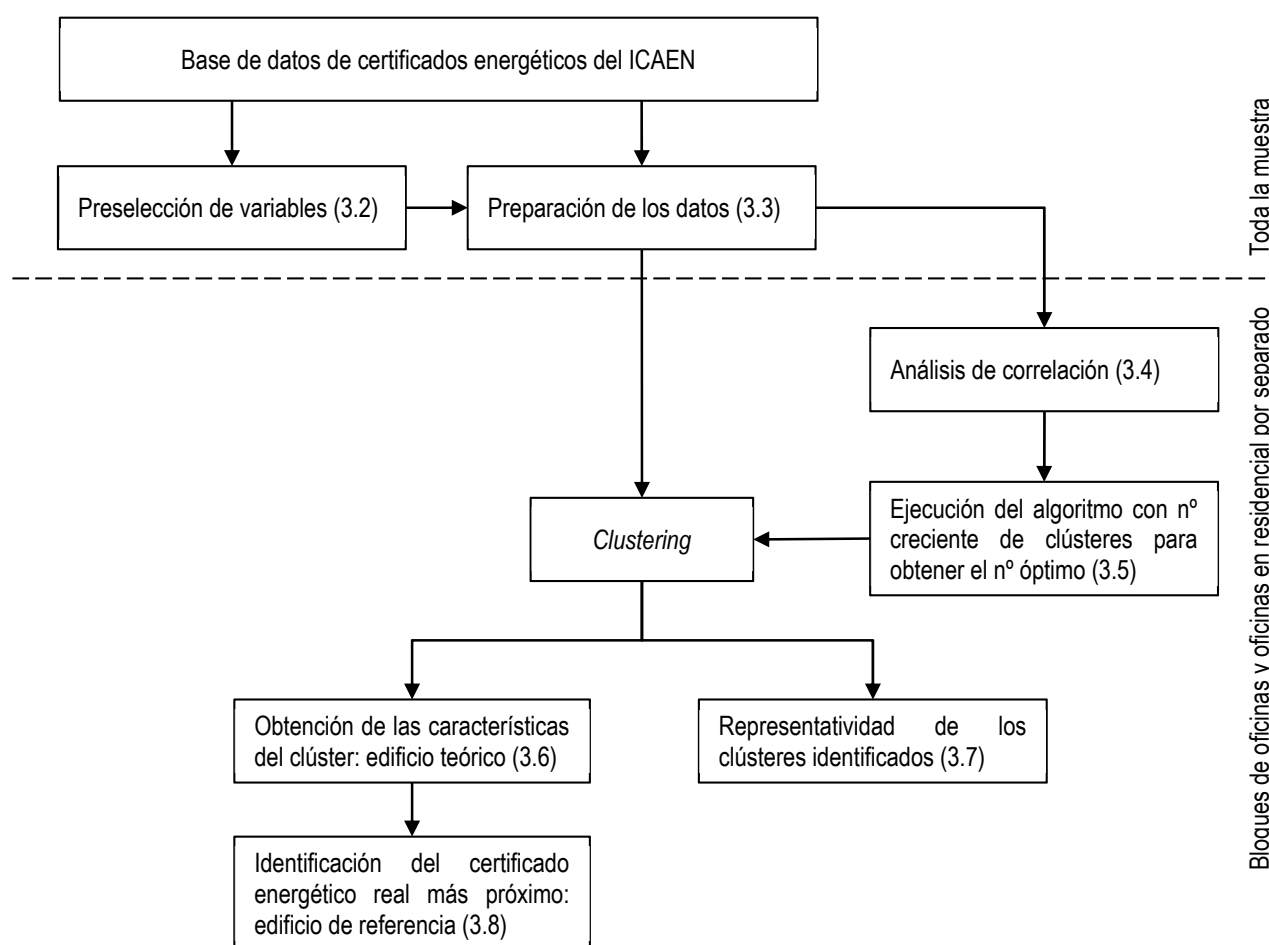


Figura 2. Metodología para la segmentación de las oficinas construidas.

3.2 Preselección de variables

La base de datos y los campos que incluye se estudian minuciosamente para preseleccionar, de entre todas las características disponibles, aquellas variables que se someterán al análisis de correlación. La preselección se realiza

teniendo en cuenta, de las 130-170 variables que conforman un certificado energético, aquellos parámetros que pueden tener un impacto en el consumo de energía:

- Procedimiento de certificación (herramienta utilizada).
- Consumo de energía anual por m² (en kWh).
- Superficie habitable.
- Compacidad (cociente entre el volumen encerrado por la envolvente térmica y la suma de las superficies de dicha envolvente).
- Contribución solar ACS (porcentaje de contribución de los paneles solares al ACS de la oficina).
- Energía solar fotovoltaica (Sí / No).
- Energía geotérmica (Sí / No).
- Normativa de construcción (depende del período de construcción de la oficina).
- Zona climática.
- Tipo de oficina (tipología edificatoria: bloque de oficinas, oficina en edificio industrial u oficina en edificio residencial).
- Tipo de calefacción (No / Individual / Centralizada).
- Tipo de refrigeración (No / Individual / Centralizada).
- Aislamiento en cerramientos.
- Apertura mayoritaria (tipo de ventana).
- Fuente de energía calefacción.
- Fuente de energía ACS.
- Fuente de energía refrigeración.

3.3 Preparación de los datos

La base de datos proporcionada por el ICAEN consta de una serie de tablas en varios formatos, las cuales contienen distinta información o características de los certificados energéticos. Es decir, para un mismo certificado con un determinado ID, la información de la zona climática, el consumo energético, el tipo de sistema de calefacción... se encontrará en archivos distintos.

La preparación de los datos consiste en importar la base de datos, combinar los datos en una sola tabla, crear nuevas variables (en caso de que se pueda crear una nueva variable a partir de las originales), unificar nombres de categorías,

eliminar valores atípicos, crear variables ficticias, verificar la veracidad de los datos y finalmente normalizar los datos. Estos pasos se realizarán mediante el programa *KNIME Analytics Platform 4.0.0*, que permite abrir y combinar formatos de texto simples (CSV, PDF, XLS, JSON, XML, etc.), tipos de datos no estructurados (imágenes, documentos, redes, moléculas, etc.) o datos variables con el tiempo.

Una vez importados los datos, la combinación de las tablas se hace a partir de la unión de las filas de acuerdo con su ID (cada fila corresponde a un certificado energético), y conservando como columnas únicamente las variables preseleccionadas. Las tablas se han unido internamente incluyendo incluso filas con algunos valores nulos para tener una muestra lo más grande posible.

Con el objetivo de encontrar nuevas variables, se han creado funciones de correlación entre algunas variables. Esto ha permitido, por ejemplo, refinar la categorización del tipo de edificio en función de su dirección y la actividad desarrollada en el interior. Por otro lado, los valores de algunas variables no cuantitativas o de campo abierto han sido unificados, ya que los certificadores pueden cargar certificados en idiomas diferentes o usar términos distintos para un mismo concepto.

Seguidamente, se han eliminado los valores atípicos. Esto ha consistido en limitar la compacidad (V/S) a 25 m³/m², la superficie habitable entre 10 y 20.000 m² y el consumo de energía entre 1 y 2.000 kWh/m²·año. Estos límites se han definido teniendo en cuenta las limitaciones físicas (el caso del factor de forma) y los valores extremos. Después de la eliminación de los valores atípicos, se ha hecho una revisión visual de los datos en busca de incongruencias (por ejemplo, direcciones que no corresponden a la provincia o zona climática). Finalmente, se han descompuesto las variables nominales y se han convertido en variables ficticias numéricas, a la vez que se han normalizado las variables continuas y de intervalo con valores entre 0 y 1.

3.4 Análisis de correlación

El análisis estadístico de los certificados permite concluir que las oficinas en edificios residenciales son el grupo predominante, representando un 76,58% de los certificados energéticos (Tabla 1). Por este motivo y con el objetivo de no “perder” los datos de los bloques de oficinas que quedarían absorbidos por el grupo predominante de oficinas en edificios residenciales, se han realizado dos análisis de correlación, uno para cada tipología constructiva. De esta manera, el objetivo principal del proyecto (bloques de oficinas) está bien representado en un clustering dedicado.

Tipología constructiva	Muestra (nº certificados)	Porcentaje
Bloques de oficinas y oficinas en edificios industriales	3.190	23,42%
Oficinas en edificios residenciales	10.431	76,58%
Total	13.621	100%

Tabla 1. Proporción del número de certificados para cada tipología constructiva.

Una vez hecha esta diferenciación, se procede a determinar las variables que contribuyen de forma significativa en el consumo de energía de cada tipología constructiva a partir de las variables preseleccionadas en el apartado 3.1.1. Esto se lleva a cabo mediante la aplicación del análisis de regresión *forward stepwise multiple regression analysis* mediante el programa de análisis estadístico SPSS. Este análisis consta de dos fases. En la primera fase, el modelo empieza sin ninguna variable y la variable más significativa se agrega al modelo. Este proceso se repite hasta que no haya más variables que tengan una significación por debajo del límite definido (en este estudio, el valor p máximo se ha definido de 0,05). En la segunda fase, se realiza la eliminación hacia atrás. Este paso implica eliminar los efectos cuyo valor de p está por encima del límite especificado (0,10 en este caso), comenzando con el efecto con el valor de p más alto. Cuando ya no se pueden eliminar más variables, se completa la regresión.

Debido a que al hacer la regresión se eliminan del análisis aquellas filas con valores faltantes, y que los datos analizados en este proyecto tenían un número importante de huecos, el análisis de regresión paso a paso se ha realizado dos veces para cada tipología. Para el subconjunto de datos de bloques de oficinas y oficinas en edificios industriales, el primer análisis de regresión considera todas las variables preseleccionadas, usando solamente 843 certificados energéticos de los 3.190 disponibles (el resto son eliminados de la regresión al haber valores faltantes). Durante el segundo análisis, solo se introducen las variables significativas obtenidas en la ejecución anterior, lo que aumenta el número de filas sin valores nulos a 2.503. Para el subconjunto de datos de oficinas en edificios residenciales, el enfoque de dos pasos aumenta el número de certificados analizados de 1.984 a 3.582 (de los 10.431 certificados disponibles).

Es a partir de este segundo análisis de regresión del cual se extraen los coeficientes de regresión para cada una de las tipologías (Tabla 2 y Tabla 3). Estos coeficientes son los usados para ponderar las variables cuando se realiza el agrupamiento por método “k-means” en el siguiente apartado. De esta forma, se crearán los clústeres priorizando las variables con pesos más altos, es decir, con un mayor impacto en el consumo de energía.

Variable significativa	Coefficiente
Normativa de construcción	0,319
Apertura mayoritaria (tipo de ventana)	0,238
Zona climática	0,217
Sistema de refrigeración	0,098
Superficie habitable	0,090
Compacidad	0,038

Tabla 2. Coeficientes de regresión de las variables significativas obtenidos en la segunda iteración para el subconjunto de datos incluyendo bloques de oficinas y oficinas en edificios industriales.

En la siguiente Tabla 3 se indican los coeficientes de regresión obtenidos para oficinas en edificios residenciales.

Variable significativa	Coefficiente
Compacidad	0,407
ACS	0,282
Zona climática	0,121
Normativa de construcción	0,085
Tipo de refrigeración	0,061
Fuente energética de calefacción	0,025
Aislamiento	0,020

Tabla 3. Coeficientes de regresión de las variables significativas obtenidos en la segunda iteración para el subconjunto de datos de oficinas en edificios residenciales.

3.5 Validez y número óptimo de clústeres

Antes de encontrar el número óptimo de clústeres, se debe verificar si la muestra de edificios es lo suficientemente grande para considerar que es representativa de la población, calculando la muestra mínima de acuerdo con la ecuación (1).

$$Muestra\ mínima = \frac{\frac{X^2 \cdot p(1-p)}{e^2}}{1 + \frac{X^2 \cdot p(1-p)}{e^2 \cdot N}} \quad (1)$$

Donde z es una constante cuyo valor depende del nivel de confianza ($X^2=3,841$ considerando un nivel de confianza del 95%), p es la heterogeneidad (consideramos el caso más adverso de $p=0,50$), N es el tamaño de la población (en nuestro caso es el número total de oficinas en Catalunya, $N=47.212$) y e es el margen de error ($e=0,05$). Con estos valores, el tamaño mínimo de la muestra es de **382 edificios de oficinas**.

Como el clustering por “ k -means” se ejecutó con una muestra de 6.085 edificios (2.503 bloques de oficinas y oficinas en edificios industriales y 3.582 oficinas en edificios residenciales), es correcto suponer que los resultados del cada clustering son representativos de toda la población.

Las entradas para hacer la agrupación son las observaciones y el número de clústeres. Por lo tanto, la cantidad de grupos debe definirse antes de ejecutar el algoritmo. Sin embargo, no se conoce el número óptimo de agrupaciones hasta que se obtienen y analizan los resultados de la agrupación. En consecuencia, se debe ejecutar el algoritmo con un número creciente de agrupaciones cada vez y trazar los gráficos de validez apropiados. En algoritmos no jerárquicos como en los del método “ k -means”, los índices de validez más apropiados son el RMSSTD y el RS (son complementarios).

En este estudio, el índice seleccionado es el RMSSTD, que viene dado por la ecuación (2).



$$RMSSTD = \left[\frac{\sum_{j=1 \dots d} \sum_{i=1 \dots k} n_{ij} (x_{iq} - \bar{x}_j)^2}{\sum_{j=1 \dots d} (n_{ij} - 1)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Donde k es el número de grupos, d el número de variables (dimensión de los datos), n_{ij} el número de valores de datos de dimensión j pertenecientes al grupo i , y \bar{x}_j es la media de los valores de datos de dimensión j .

Una vez trazado el gráfico RMSSTD vs número de clústeres (en este caso, se han considerado hasta 25 clústeres), se aplica el método de validez *Elbow Method*, conocido como el método del codo. Este método consiste en detectar a partir de qué punto, llamado *elbow* o codo, agregar un clúster adicional no aumentará sustancialmente la información de variación. En este caso, el proceso se ha realizado dos veces, una para cada tipología constructiva (bloques de oficinas u oficinas en edificios industriales, y oficinas en edificios residenciales).

Como se muestra en la Figura 3 y la Figura 4, el codo para los bloques de oficinas y las oficinas en edificios industriales está ubicado en 7 clústeres, mientras que para las oficinas en edificios residenciales este se encuentra en el punto con 9 clústeres. Este límite se establece porque, si se usaran más clústeres, la ganancia de información no sería suficiente para compensar el clúster adicional.

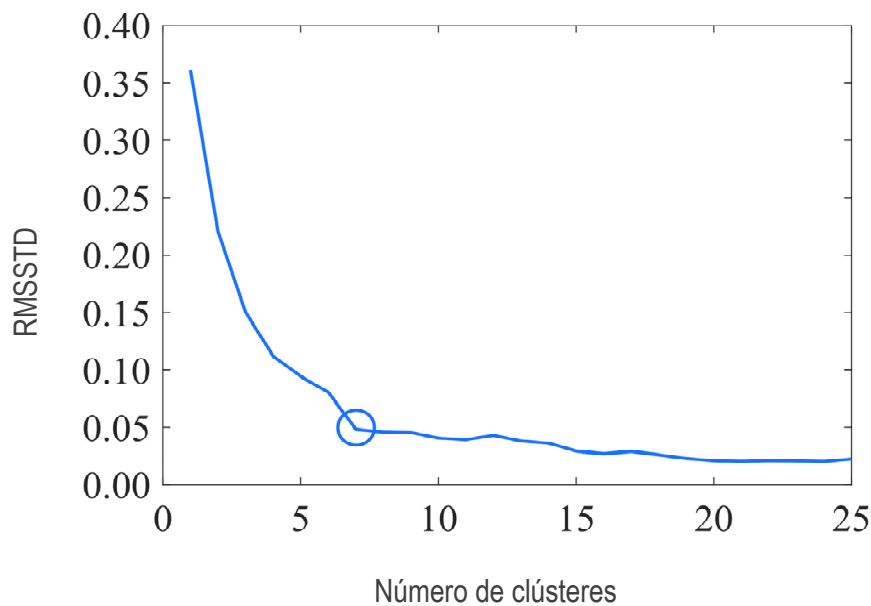


Figura 3. Gráfico de validez del clustering a partir del índice RMSSTD para las oficinas de bloque y oficinas en edificios industriales.

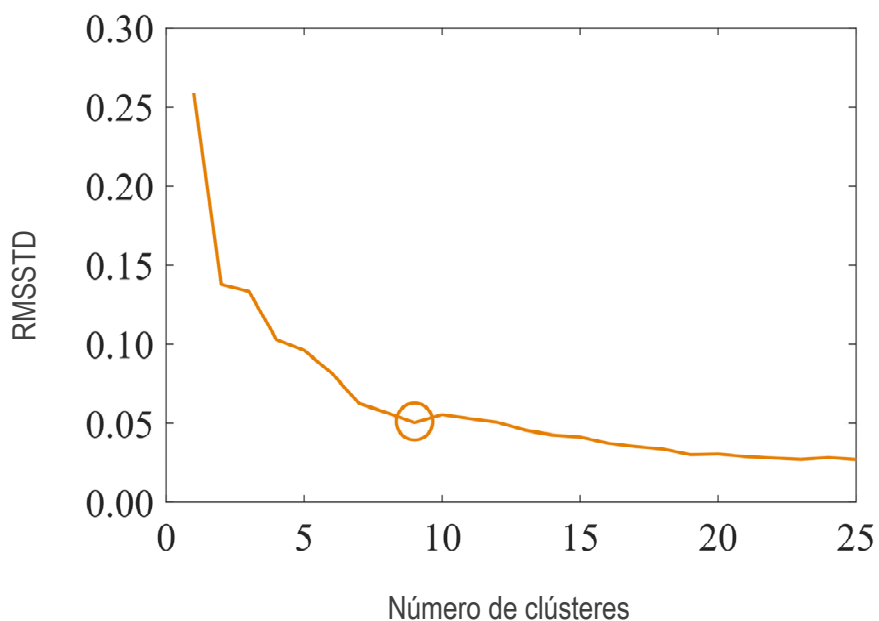


Figura 4. Gráfico de validez del clustering a partir del índice RMSSTD para las oficinas en edificios residenciales.

Finalmente, teniendo las entradas para ejecutar el algoritmo y obtener los resultados definitivos, que son las observaciones y el número óptimo de clústeres, se realiza el clustering de los certificados de bloques de oficinas y oficinas en edificios industriales por un lado, y el de oficinas en edificios residenciales por otro.

3.6 Obtención de los edificios de referencia teóricos

A continuación, se identifican las características del edificio teórico más representativo para cada clúster. Esto se hace clúster a clúster seleccionando, para cada variable, el valor o la expresión más significativa para ese grupo. Después de repetir este proceso para cada grupo dentro de las dos tipologías edificatorias, se obtiene la lista de los edificios teóricos representativos. En la Tabla 4 se incluyen las características de cada clúster de los edificios de referencia teóricos para bloques de oficinas y oficinas en naves industriales, mientras que en la Tabla 5 se muestran las características de los edificios de referencia teóricos para oficinas en edificios residenciales.

Clúster	Superficie habitable (m ²)	Compacidad (m ³ /m ²)	Año	Zona climática	Tipo refrigeración	Tipo ventanas
B1	312,71	2,99	Anterior	C2	Individual	Cristal Simple
B2	507,98	3,18	Anterior	C2	Individual	Cristal Doble
B3	518,47	2,77	NBE-CT-79	C2	Individual	Cristal Doble
B4	114,75	2,61	NBE-CT-79	C2	Sin refrigeración	Cristal Simple
B5	178,36	2,32	NBE-CT-79	D2	Individual	Cristal Simple
B6	1.323,39	2,80	CTE	C2	Individual	Cristal Doble BE
B7	196,01	2,57	NBE-CT-79	C2	Individual	Cristal Simple

Tabla 4. Características de los edificios de referencia teóricos para bloques de oficinas y oficinas en naves industriales.



Clúster	Compacidad (m ³ /m ²)	Año	Zona climática	Tipo refrigeración	Aislamiento	Calefacción	ACS
R1	2,94	Anterior	D2	Individual	No	Electricidad	Electricidad
R2	3,08	Anterior	C2	Sin refrigeración	No	Sin calefacción	Butano
R3	2,87	Anterior	C2	Individual	No	Electricidad	Electricidad
R4	2,91	NBE-CT-79	D2	Individual	Sí	Electricidad	Electricidad
R5	2,05	NBE-CT-79	C2	Individual	Sí	Electricidad	Electricidad
R6	12,90	Anterior	C2	Individual	No	Electricidad	Electricidad
R7	6,15	NBE-CT-79	C2	Individual	Sí	Electricidad	Electricidad
R8	3,76	Anterior	C2	Individual	No	Electricidad	Gas Natural
R9	2,84	CTE	C2	Individual	Sí	Electricidad	Electricidad

Tabla 5. Características de los edificios de referencia teóricos para oficinas en edificios residenciales.

3.7 Análisis de la representatividad de los clústeres

Como se ha demostrado en el apartado 3.5, el tamaño de la muestra usada es suficientemente grande para asumir que los resultados del clustering son representativos de toda la población. Por esta razón, se ha calculado el porcentaje de oficinas certificadas que pertenecen a cada clúster, asumiendo que este porcentaje es extrapolable al conjunto de oficinas de Catalunya.

La Figura 5 muestra la representatividad de cada clúster para los bloques de oficinas y las oficinas en edificios industriales, que tal y como se ha mencionado anteriormente representan en conjunto un 23,42% del total de certificados energéticos. Por otro lado, la Figura 6 muestra la representatividad de los clústeres obtenidos para las oficinas en edificios residenciales, que suponen el 76,58% de los certificados energéticos analizados.

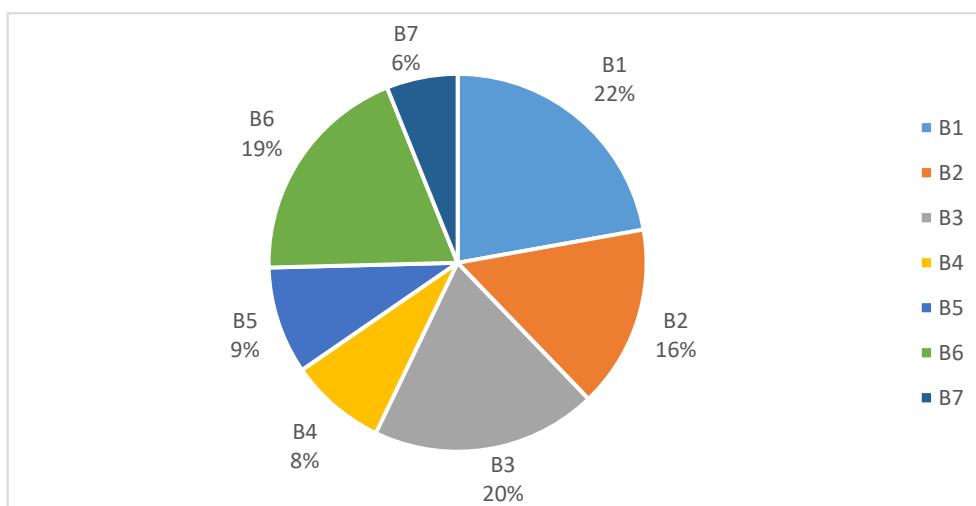


Figura 5. Representatividad de los clústeres dentro de la tipología constructiva de bloques de oficinas y oficinas en edificios industriales.

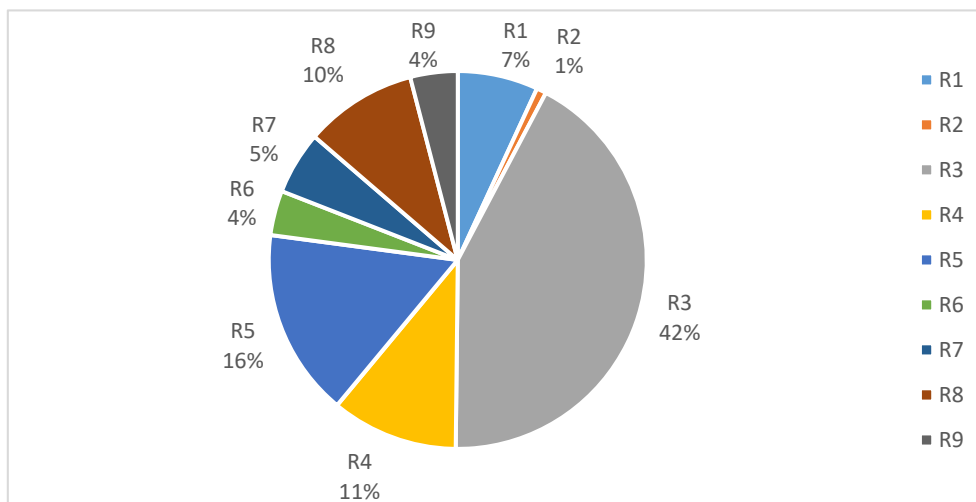


Figura 6. Representatividad de los clústeres dentro de la tipología constructiva de oficinas en edificios residenciales.

3.8 Obtención de los edificios de referencia reales

El siguiente paso consiste en encontrar un edificio de referencia real para cada grupo. Esto se hace calculando la distancia entre el centroide del grupo y cada certificado. El más cercano, es decir, el edificio certificado con la distancia más corta, se considerará el edificio de referencia.

De cara al análisis energético de estos edificios, en el caso de bloques de oficinas y oficinas dentro de edificios industriales se priorizan los certificados de eficiencia energética creados con HULC (Herramienta Unificada Lider-Calener). Por lo tanto, cuando sea posible, se selecciona un certificado HULC para representar cada grupo (si hay más de un certificado HULC en un grupo, se selecciona el que tiene la distancia más pequeña). Si no se encuentra un certificado HULC, se elige el certificado CE3X más próximo.

Para verificar la similitud entre el edificio teórico (el centroide de un grupo) y el edificio certificado real seleccionado, se calcula un índice llamado representatividad. Gracias a este índice, se puede detectar si no hay un certificado similar al centroide original del clúster. El índice de representatividad es un promedio ponderado de la diferencia entre los valores de los parámetros del centroide y el edificio certificado seleccionado, y se calcula de acuerdo con la ecuación (3).

$$\text{Representatividad (\%)} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \cdot (p_{i \text{ ref}} - p_{i \text{ cert}})}{\sum_{i=1}^n k_i} \cdot 100 \quad (3)$$

Donde n es el número de parámetros, k el coeficiente de ponderación (extraído del análisis de regresión), $p_{i \text{ ref}}$ es el valor del parámetro en el centroide del cluster, $p_{i \text{ cert}}$ es el valor del parámetro en el edificio certificado seleccionado, e i es el índice que define el parámetro cuya diferencia se calcula. Una representatividad del 100% indica que las características del edificio certificado seleccionado son exactamente iguales a las del centroide del clúster.

En la Tabla 6 se muestran las características de los edificios de referencia reales para bloques de oficinas y oficinas en naves industriales considerando los parámetros más representativos de cada variable, incluyendo también el programa de certificación usado y la representatividad.

Clúster	Superficie habitable (m ²)	Compacidad (m ³ /m ²)	Año	Zona climática	Tipo refrigeración	Tipo ventanas	Programa certificación	Representatividad (ponderada)
B1	193,51	1,08	Anterior	C2	Sin refrigeración	Cristal Simple	CALENER VYP	89,83%
B2	7.513,76	3,19	Anterior	C2	Centralizada	Cristal Doble	CALENER GT	86,83%
B3	1.992,52	2,79	NBE-CT-79	C2	Centralizada	Cristal Doble	CALENER VYP	89,49%
B4	47,51	2,22	NBE-CT-79	C2	Sin refrigeración	Cristal Simple	CE3X	99,97%
B5	428,80	2,30	NBE-CT-79	D2	Individual	Cristal Doble BE	HULC (CALENER VYP)	76,07%
B6	1.724,21	2,17	CTE	C2	Individual	Cristal Doble BE	CALENER VYP	99,78%
B7	89,00	2,68	NBE-CT-79	C2	Individual	Cristal Simple	CE3X	99,95%

Tabla 6. Características de los edificios de referencia reales para bloques de oficinas y oficinas en naves industriales.

En la Tabla 7 se muestran las características de los edificios de referencia reales para oficinas en edificios residenciales considerando los parámetros más representativos de cada variable, incluyendo también el programa de certificación usado (que en todos los casos es el CE3X) y la representatividad.

Clúster	Compacidad (m ³ /m ²)	Año	Zona climática	Tipo refrigeración	Aislamiento	Calefacción	ACS	Programa certificación	Representatividad (ponderada)
R1	2,96	Anterior	D2	Individual	No	Electricidad	Electricidad	CE3X	99,97%
R2	3,80	Anterior	C2	Sin refrigeración	No	Sin calefacción	GLP	CE3X	98,75%
R3	2,86	Anterior	C2	Individual	No	Electricidad	Electricidad	CE3X	99,99%
R4	2,55	NBE-CT-79	C2	Individual	Sí	Electricidad	Electricidad	CE3X	87,29%
R5	2,04	NBE-CT-79	C2	Individual	Sí	Electricidad	Electricidad	CE3X	99,98%
R6	12,44	Anterior	C2	Individual	No	Electricidad	Electricidad	CE3X	99,20%
R7	6,17	NBE-CT-79	C2	Individual	Sí	Electricidad	Electricidad	CE3X	99,96%
R8	3,71	Anterior	C2	Individual	No	Electricidad	Gas natural	CE3X	99,91%
R9	2,85	CTE	C2	Individual	Sí	Electricidad	Electricidad	CE3X	99,98%

Tabla 7. Características de los edificios de referencia reales para oficinas en edificios residenciales.

4. Medidas de rehabilitación energética

En los sub-apartados de a continuación se presentan las características técnicas de cada medida de rehabilitación, que deberán ser simuladas en los programas de certificación energética HULC y CE3X para evaluar el comportamiento energético del edificio. El primer sub-apartado contiene los datos de las medidas primarias, el segundo sub-apartado contiene los datos de las secundarias, el tercero especifica los ahorros energéticos asociados a la aplicación de medidas terciarias y, finalmente, el último sub-apartado reúne las características de los paquetes de medidas identificados en la Tarea 2 de este proyecto.

En la Tabla 8 se indica la aplicabilidad de cada grupo de medidas de rehabilitación según la tipología edificatoria.

Código	Medidas de rehabilitación	Aplicabilidad según tipología edificatoria	
		Bloque de oficinas y oficinas en industrial	Oficina en residencial
P1-P8	Aislamiento de fachada por el exterior	X	
P9-P22	Aislamiento de fachada en la cámara de aire	X	X
P23-P34	Aislamiento de fachada por el interior	X	X
P35-P36	Aislamiento de cubierta transitable por el exterior	X	
P37-P40	Aislamiento de cubierta por el interior (en residenciales, solo en ático)	X	X
P41-P44	Mejora de las ventanas	X	X
P45	Colocación de protecciones solares. Toldo articulado	X	X
P46	Colocación de protecciones solares. Filtros solares	X	X
P47	Mejora de estanqueidad	X	X
S1	Sustitución sistema de climatización	X	X
S2	Incorporación recuperador de calor en sistema de ventilación	X	
S3-S4	Iluminación LED y balastos	X	X
S5	Sustitución ascensor existente por uno de última generación	X	
T1	Instalación de sistemas de gestión y control para la mejora de la eficiencia de la climatización y la iluminación	X	
T2-T3	Acciones para el cambio de comportamiento de los usuarios	X	X

Tabla 8. Aplicabilidad de las medidas de rehabilitación según la tipología edificatoria.

4.1 Medidas primarias

A continuación, se indican los valores de las principales características de las diferentes medidas primarias de mejora de la eficiencia energética en relación al aislamiento de fachada, el aislamiento de cubierta, la intervención sobre los huecos, la colocación de protecciones solares y la mejora de la estanqueidad.

En la Tabla 9 se indican la conductividad térmica (λ), la densidad (ρ), el calor específico (C_p) y el factor adimensional de resistencia a la difusión del vapor de agua (μ) de las medidas de aislamiento de fachada y cubierta. Estos valores se han obtenido tanto de las librerías de materiales predeterminadas de los programas HULC y CE3X, como de catálogos de proveedores.

	Código medida	Descripción de la medida	λ (W/m·K)	ρ (kg/m³)	C_p (J/kg·K)	μ
Aislamiento de fachada por el exterior	P1	EPS 6 cm	0,037	30	1.000	20
	P2	EPS 12 cm	0,037	30	1.000	20
	P3	XPS 6 cm	0,035	38	1.000	100
	P4	XPS 12 cm	0,035	38	1.000	100
	P5	Lana de roca 6 cm	0,037	50	800	1
	P6	Lana de roca 12 cm	0,037	50	800	1
	P7	Corcho expandido 6 cm	0,040	110	1.850	10
	P8	Corcho expandido 12 cm	0,040	110	1.850	10
Aislamiento de fachada por la cámara de aire	P9	EPS grafitado 5 cm	0,034	20	1.000	5
	P10	EPS grafitado 10 cm	0,034	20	1.000	5
	P11	Lana de vidrio 5 cm	0,035	50	800	1
	P12	Lana de vidrio 10 cm	0,035	50	800	1
	P13	PUR inyectado 5 cm	0,037	18	1.000	20
	P14	PUR inyectado 10 cm	0,037	18	1.000	20
	P15	Celulosa granulada 5 cm	0,040	50	2.150	1
	P16	Celulosa granulada 10 cm	0,040	50	2.150	1
	P17	Corcho inyectado 5 cm	0,040	70	1.850	10
	P18	Corcho inyectado 10 cm	0,040	70	1.850	10
	P19	Lana de oveja 5 cm	0,040	14	1.000	1
	P20	Lana de oveja 10 cm	0,040	14	1.000	1
	P21	Algodón inyectado 5 cm	0,040	20	850	1
	P22	Algodón inyectado 10 cm	0,040	20	850	1
Aislamiento de fachada por el interior (solo para oficinas en	P23	EPS 5 cm	0,037	30	1.000	20
	P24	EPS 10 cm	0,037	30	1.000	20
	P25	Lana de roca 5 cm	0,037	50	800	1



	Código medida	Descripción de la medida	λ (W/m·K)	ρ (kg/m ³)	Cp (J/kg·K)	μ
edificios residenciales)	P26	Lana de roca 10 cm	0,037	50	800	1
	P27	Celulosa 5 cm	0,040	70	2.000	1
	P28	Celulosa 10 cm	0,040	70	2.000	1
	P29	Corcho 5 cm	0,040	100	1.850	10
	P30	Corcho 10 cm	0,040	100	1.850	10
	P31	Lana de oveja 5 cm	0,037	15	1.000	1
	P32	Lana de oveja 10 cm	0,037	15	1.000	1
	P33	Algodón 5 cm	0,040	30	850	1
	P34	Algodón 10 cm	0,040	30	850	1
	Aislamiento de cubierta por el exterior	P35	XPS 8 cm	0,035	38	1.000
P36		XPS 12 cm	0,035	38	1.000	100
P37		EPS 4 cm	0,037	30	1.000	20
Aislamiento de cubierta por el interior	P38	EPS 8 cm	0,037	30	1.000	20
	P39	Lana de roca 4 cm	0,037	40	1.000	1
	P40	Lana de roca 8 cm	0,037	40	1.000	1

Tabla 9. Características técnicas de las medidas de aislamiento de fachada y cubierta.

Seguidamente, en la Tabla 10 se indican la transmitancia térmica del marco y el vidrio (U), el factor solar del vidrio, el porcentaje de cobertura del marco, la absortividad del marco (A) y la permeabilidad al aire a 100 Pa de las medidas de intervención sobre huecos. Los valores de las características se han buscado para ventanas oscilobatientes de una hoja con pre-marco y sin persiana.

	Código medida	Descripción de la medida	U (W/m ² ·K)		Factor solar	% de cobertura del marco	A	Permeabilidad al aire (m ³ /h·m ² a 100 Pa)
			marco	vidrio				
Intervención sobre los huecos	P41	Marco de PVC y vidrio 4/12/4	1,3	2,9	0,76	30	0,4	3 (Clase 4)
	P42	Marco de PVC y vidrio 4/16/4 bajo emisivo	1,3	1,5	0,58	30	0,4	3 (Clase 4)
	P43	Marco de aluminio con rotura de puente térmico y vidrio 4/12/4	3,1	2,9	0,76	30	0,4	3 (Clase 4)
	P44	Marco de aluminio con rotura de puente térmico y vidrio 4/16/4 bajo emisivo	3,1	1,5	0,58	30	0,4	3 (Clase 4)

Tabla 10. Características técnicas de las medidas de intervención sobre los huecos.

En los programas de certificación energética, las medidas de intervención sobre los huecos mediante toldos o filtros solares se representan como el factor solar resultante del hueco (Tabla 11). Por un lado, se considera la instalación de toldos articulados de 2 m de ancho, con una inclinación de 45°, de tejido traslúcido, extendidos entre los meses de junio a setiembre e instalados en las ventanas orientadas al Sud-Este, Sud, Sud-Oeste y Oeste. El cálculo del factor solar modificado de los huecos se realiza siguiendo las directrices del Documento de Apoyo al Documento Básico, DB-HE Ahorro de energía (Ministerio de Fomento, 2018). Por otro lado, se considera la instalación de filtros solares en ventanas y puertas de vidrio, resultando en distintos valores de factor solar y transmitancia térmica según el tipo de vidrio y la orientación.

	Código medida	Descripción de la medida	Vidrio	Orientación	Factor solar	U (W/m ² K)
Colocación de protecciones solares	P45	Colocación toldo articulado	Simple	SE/S/SW	0,15	NA
				W	0,17	NA
			Doble	SE/S/SW	0,14	NA
				W	0,15	NA
			Doble BE	SE/S/SW	0,10	NA
				W	0,12	NA
	P46	Filtros solares (superficie hueco ventana)	Simple	N/E	0,53	3,6
				S/W	0,41	3,6
			Doble	N/E	0,51	2,0
				S/W	0,46	2,0
			Doble BE	N/E	0,37	1,1
				S/W	0,34	1,1

Tabla 11. Características técnicas de las medidas de colocación de protecciones solares.

Finalmente, en un estudio realizado sobre los edificios históricos de Oporto (Alves, S., Sendra, J.J., 2012) se determinó que al mejorar la tasa de infiltración de las ventanas de un edificio se puede obtener un aumento significativo de la eficiencia energética en las cargas de calefacción. De esta investigación se extrae que es posible disminuir en un tercio las infiltraciones debido a la mejora de la estanqueidad (Tabla 12), suponiendo una reducción intermedia de los ACH (Air Changes per Hour, cambios de aire por hora).

	Código medida	Descripción de la medida	Disminución de las infiltraciones
Mejora de la estanqueidad	P47	Instalación de burletes, cintas adhesivas y masilla elástica	Disminución del 33% de las infiltraciones

Tabla 12. Características técnicas de las medidas de mejora de la estanqueidad.

4.2 Medidas secundarias

A continuación, se relacionan las principales características de las diferentes medidas secundarias de mejora de la eficiencia energética en relación a la sustitución del sistema de climatización por uno más eficiente, la incorporación de un recuperador de calor en el sistema de ventilación, la sustitución de las lámparas existentes por otras más eficientes y la mejora de equipos.

Tras estudiar las 16 oficinas de referencia, se ha determinado que el tipo de sistema de climatización es demasiado heterogéneo para establecer una medida genérica, y que solo se puede marcar unas características genéricas comunes (Tabla 13). Por esta razón, se ha buscado para cada oficina la mejora individualizada según el sistema de climatización proporcionado por el certificado energético.

	Código medida	Descripción de la medida	COP calor	EER frío
Sustitución sistema de climatización	S1	Sustitución sistema de climatización por uno más eficiente	4,0	3,7
Recuperador de calor en sistema de ventilación	S2	Incorporación de un recuperador de calor en el sistema de ventilación	Eficiencia nominal = 85%. Eficiencia estacional según zona climática.	

Tabla 13. Características técnicas de las medidas de renovación e instalación de bomba de calor.

Por lo que a sustitución de lámparas se refiere, el ahorro asociado a cada medida (Tabla 14) se extrae de la información ya facilitada en la Tarea 2 de este proyecto, que basan los datos en estudios realizados por el ICAEN y la Comunidad de Madrid.

	Código medida	Descripción de la medida	Ahorro asociado
Sustitución de las lámparas	S3	Sustitución de las luminarias existentes por LEDs	Se supone un ahorro del 55% en la potencia instalada (W/m^2) al sustituir fluorescentes convencionales por LEDs.
	S4	Sustitución de los balastos existentes por balastos electrónicos	Se supone un ahorro energético en el consumo final en iluminación del 22,6%.

Tabla 14. Características técnicas de las medidas de sustitución de lámparas.

Finalmente, para aquellos bloques de oficinas con ascensor, se propone sustituirlo por uno de última generación y adaptar sus instalaciones por unas de mayor eficiencia energética. Comúnmente este tipo de intervención supone la instalación de un ascensor con un motor eléctrico síncrono y un estator constituido por imanes, la sustitución de los cables de acero por cintas planas de acero recubiertas de poliuretano (más ligeras y mayor vida útil), el cambio del cuadro de maniobra por uno basado en microprocesadores, la incorporación de un sistema de apagado automático de la iluminación (de bajo

consumo) de la cabina y, opcionalmente, se añaden sistemas regenerativos de energía (Comunidad de Madrid, 2016). El ahorro energético asociado se incluye en la Tabla 15.

	Código medida	Descripción de la medida	Ahorro energético
Sustitución por ascensor más eficiente	S5	Sustitución ascensor por uno más eficiente (solo en bloques de oficinas que ya tuviesen ascensor)	El consumo energético del ascensor pasa de ser entre el 5-8% del consumo energético total, al 2-3% (Comunidad de Madrid, 2017)

Tabla 15. Ahorro energético asociado a la renovación del ascensor por uno de última generación.

4.3 Medidas terciarias

Como se ha comentado con anterioridad, las medidas terciarias incluyen tanto la instalación de elementos de gestión y control del consumo de energía, como las acciones para el cambio de comportamiento de los usuarios.

Por lo que a los sistemas de gestión y control automatizados se refiere, estos optimizan el uso de las instalaciones y maximizan su eficiencia energética de acuerdo con las necesidades que deben satisfacerse. Investigaciones recientes aplicadas en un caso real en el ámbito de las oficinas sitúan entorno un 5% el ahorro energético global derivado de la instalación de un sistema de gestión energético inteligente (Yoon et al., 2018).

Por otro lado, según un informe de la agencia europea del medio ambiente (European Environment Agency, 2013), se puede lograr hasta un 20% de ahorro de energía a través de diferentes medidas dirigidas a influir en el comportamiento del usuario del edificio en cuestión. En el contexto de *Horizon 2020 EU.3.3.1. - Reducir el consumo de energía y la huella de carbono mediante un uso inteligente y sostenible*, la Comisión Europea financió varios proyectos de implementación de juegos serios para el ahorro energético en el ámbito de las oficinas. En la Tabla 16 se adjuntan los resultados obtenidos en algunos de estos proyectos, oscilando en ahorros energéticos de entre 1,90% y 35,64%.

Proyecto	Ahorro energético
ENTROPY - Design of an innovative energy-aware it ecosystem for motivating behavioural changes towards the adoption of energy efficient lifestyles	En los edificios piloto españoles: en Pleiades se logró una disminución del 6,62% de consumo en calefacción, un 4,90% en refrigeración y un 20,11% en iluminación; en la Nave se logró una disminución del 35,64% del consumo energético.
ORBEET - ORganizational Behaviour improvement for Energy Efficient adminisTrative public offices	El consumo energético anual de los edificios de oficinas puede reducirse entre el 16,88% y el 21,28%.
GreenPlay - Game to promote energy efficiency actions	La disminución de las temperaturas corresponde a un ahorro teórico de energía en promedio de 4,6% para LE COL, 1,9% para OPAC y 10,4% para Vigo.

Tabla 16. Resultados de los proyectos de desarrollo de juegos serios en el contexto de Horizon 2020 EU.3.3.1. de la Comisión Europea.

El ahorro del consumo energético anual global por oficina asociado a las medidas terciarias, teniendo en cuenta toda la información proporcionada, se adjunta en la Tabla 17. En el caso de las medidas de concienciación de los usuarios, se consideran dos escenarios con distintos ahorros energéticos asociados según el nivel de implicación de los usuarios.

	Código medida	Descripción de la medida	Ahorro del consumo energético anual
Sistemas de gestión y control	T1	Instalación de sistemas de gestión y control para la mejora de la eficiencia de la climatización y la iluminación	5%
Concienciación usuarios	T2	Acciones para el cambio de comportamiento de los usuarios con baja implicación	10%
	T3	Acciones para el cambio de comportamiento de los usuarios con alta implicación	20%

Tabla 17. Ahorro energético asociado a la instalación de sistemas de gestión y control a la oficina y de la concienciación de los usuarios.

4.4 Paquetes de medidas

Este sub-apartado detalla los paquetes de medidas de mejora que se analizarán en las tipologías de referencia identificadas. Las características de cada medida corresponderán a las mencionadas en sub-apartados anteriores. En el caso de la rehabilitación integral, se propone un paquete para bloques de oficinas e industriales (PQ1-B) y uno para oficinas en residencial (PQ1-R). Para la rehabilitación de bajo coste se propone el mismo paquete para ambas tipologías.

Código del paquete de medidas	Descripción del paquete de medidas	Código medidas	Descripción de las medidas
primar	Rehabilitación integral bloques de oficinas	P1	Aislamiento de fachada por el exterior con EPS de 6 cm
		P35	Aislamiento de cubierta por el exterior con XPS de 8 cm
		P42	Sustitución de las ventanas existentes por otras con marco de PVC y vidrio 4/16/4 BE
		S1	Sustitución del sistema de climatización por uno más eficiente
		S2	Incorporación de un recuperador de calor en el sistema de ventilación
PQ1-R	Rehabilitación integral oficinas en residencial	P23	Aislamiento de fachada por el interior con EPS de 5 cm
		P42	Sustitución de las ventanas existentes por otras con marco de PVC y vidrio 4/16/4 BE
		S1	Sustitución sistema de climatización por uno más eficiente
PQ2	Rehabilitación de bajo coste	P46	Instalación de filtros solares
		P47	Instalación de burletes, cintas adhesivas y masilla elástica
		S3	Sustitución de las luminarias existentes por LEDs

Tabla 18. Características de los paquetes de mejora.

5. Discusión de resultados

Una vez obtenidas las características definitivas de los edificios de referencia y de las medidas energéticas a aplicar, se inician las simulaciones para obtener el ahorro energético derivado de la aplicación de cada una de las medidas en cada uno de los edificios.

Como se ha indicado en las tablas del apartado 3.8 de este documento, estas simulaciones se harán con el programa HULC en el caso de bloques de oficinas y oficinas en naves industriales (sub-apartado 5.1), y con el programa CE3X en el caso de oficinas en edificios residenciales (sub-apartado 5.2).

5.1 Bloques de oficinas y oficinas en naves industriales

A continuación, se adjuntan los resultados obtenidos de la simulación de los edificios de referencia y la aplicación de las distintas medidas de rehabilitación energética mediante el programa HULC de bloques de oficinas y oficinas en naves industriales.

5.1.1 Oficina de referencia B1

5.1.1.1 Descripción general

La oficina de referencia B1 es una oficina en edificio industrial de una sola planta ubicada en Sant Jordi Desvalls (Girona). Su superficie habitable es de 193,5 m² y fue construida con anterioridad al año 1980. Desde el punto de vista energético, la oficina se encuentra en la zona climática C2, tiene una compacidad de 1,08 m³/m², las aberturas son de vidrio simple, no se dispone de climatización (ni calefacción ni refrigeración) y la fuente de energía para el calentamiento del ACS es la electricidad (no hay contribución solar al sistema de ACS).

5.1.1.2 Sistema de climatización

Como ya se ha comentado en el sub-apartado anterior, esta oficina no dispone de sistema de climatización.

5.1.1.3 Otras consideraciones

Las consideraciones a tener en cuenta a la hora de analizar los resultados de la oficina B1 son:

- Debido a no disponer de sistema de climatización, el consumo energético de calefacción y refrigeración es nulo. En consecuencia, a excepción de las medidas de mejora en iluminación, todos los resultados se analizan a partir de la reducción de demanda energética.

- Al no disponer de cerramientos con cámaras de aire, en las medidas de mejoras de aislamiento de fachada en la cámara de aire (medidas P9 a P22) se ha supuesto que el aislamiento se introduce en la parte interior del cerramiento (pero debajo del enlucido de yeso) para tener en cuenta el efecto de los puentes térmicos.
- Todas las medidas de mejora de cubierta (medidas P35 a P40) se han aplicado independientemente de la tipología de cubierta (plana o inclinada) a causa de que la oficina integra ambos tipos de cubierta. De esta forma los resultados también pueden ser aplicables a oficinas con cualquier tipología.
- La medida de mejora del sistema de climatización (medida S1) no se ha aplicado debido a la no existencia previa de este sistema.
- El recuperador de calor del sistema de ventilación (medida S2) se ha modelizado como si el caudal de ventilación se redujese acorde a la eficiencia estacional del nuevo recuperador (el programa Calener VyP no puede modelizar recuperadores de calor con una eficiencia establecida por el usuario).
- Al no disponer de ascensor no se aplica la medida de sustitución del ascensor por uno más eficiente (medida S5).
- En el pack de medidas PQ1 no se ha aplicado la medida de renovación del sistema de climatización (medida S1) debido a la no existencia previa del sistema.

5.1.2 Oficina de referencia B2

5.1.2.1 Descripción general

La oficina de referencia B2 es un bloque de oficinas de seis plantas con sótano ubicado en Barcelona (Barcelona). Su superficie habitable es 7.513,8 m² y fue construido acorde a la NBE-CT-79. Desde el punto de vista energético, la oficina se encuentra en la zona climática C2, tiene una compacidad de 3,19 m³/m², las aberturas son de vidrio doble, dispone de climatización (calefacción y refrigeración) y la fuente de energía para el calentamiento del ACS es electricidad (no hay contribución solar al sistema de ACS).

5.1.2.2 Sistema de climatización

El sistema de climatización está compuesto por 8 equipos de climatización:

Equipo	Nº unidades	Tipología	Potencia refrigeración (kW)	EER	Potencia calefacción (kW)	COP
B2-A	5	Bomba de calor aire-agua 2 tubos	135,0	2,57	150,0	3,10
B2-B	1	Autónomo aire-aire	5,0	2,80	5,0	2,70

Equipo	Nº unidades	Tipología	Potencia refrigeración (kW)	EER	Potencia calefacción (kW)	COP
B2-B	1	Autónomo aire-aire	140,0	2,80	30,0	3,92
B2-D	1	Autónomo aire-aire con batería eléctrica	5,0	2,80	5,0	1,00 (batería eléctrica)

Tabla 19. Resumen de equipos de climatización de la oficina B2.

5.1.2.3 Otras consideraciones

Las consideraciones a tener en cuenta a la hora de analizar los resultados de la oficina B2 son:

- En las medidas de mejoras de aislamiento de fachada en cámara de aire (medidas P9 a P22) se ha supuesto que el espesor de aislamiento introducido es el definido en el listado de medidas de mejora (esto es, 5 y 10 cm de aislante) independientemente del grosor inicial de la cámara de aire. De esta forma los resultados son aplicables a un rango más amplio de oficinas.
- Todas las medidas de mejora de cubierta (medidas P35 a P40) se han aplicado independientemente de que la cubierta sea plana o no. De esta forma los resultados también pueden ser aplicables a oficinas con cualquier tipología.

5.1.3 Oficina de referencia B3

5.1.3.1 Descripción general

La oficina de referencia B3 es un bloque de oficinas de tres plantas ubicado en Cornellà de Llobregat (Barcelona). Su superficie habitable es 1.992,5 m² y fue construido acorde a la NBE-CT-79. Desde el punto de vista energético, la oficina se encuentra en la zona climática C2, tiene una compacidad de 2,79 m³/m², las aberturas son de vidrio doble, dispone de climatización (calefacción y refrigeración) y la fuente de energía para el calentamiento del ACS es electricidad (no hay contribución solar al sistema de ACS).

5.1.3.2 Sistema de climatización

El sistema de climatización está compuesto por un equipo de climatización autónomo centralizado tipo aire-aire:

Equipo	Nº unidades	Tipología	Potencia refrigeración (kW)	EER	Potencia calefacción (kW)	COP
B3-A	1	Autónomo aire-aire	304,5	2,00	350,2	2,50

Tabla 20. Resumen de equipos de climatización de la oficina B3.

5.1.3.3 Otras consideraciones

Las consideraciones a tener en cuenta a la hora de analizar los resultados de la oficina B3 son:

- Al no disponer de cerramientos con cámaras de aire, en las medidas de mejoras de aislamiento de fachada en la cámara de aire (medidas P9 a P22) se ha supuesto que el aislamiento se introduce en la parte interior del cerramiento (pero debajo del enlucido de yeso) para tener en cuenta el efecto de los puentes térmicos.
- Todas las medidas de mejora de cubierta (medidas P35 a P40) se han aplicado independientemente de que la cubierta sea plana o no. De esta forma los resultados también pueden ser aplicables a oficinas con cualquier tipología.
- El recuperador de calor del sistema de ventilación (medida S2) se ha modelizado como si el caudal de ventilación se redujese acorde a la eficiencia estacional del nuevo recuperador (el programa Calener VyP no puede modelizar recuperadores de calor con una eficiencia establecida por el usuario).

5.1.4 Oficina de referencia B4

5.1.4.1 Descripción general

La oficina de referencia B4 es una oficina de una sola planta con un local climatizado en el piso superior (de otra propiedad) ubicada en Palau-solità i Plegamans (Barcelona). Su superficie habitable es de 47,5 m² y fue construido acorde a la NBE-CT-79. Desde el punto de vista energético, la oficina se encuentra en la zona climática C2, tiene una compacidad de 2,22 m³/m², las aberturas son de vidrio simple, no se dispone de climatización (ni calefacción ni refrigeración) y la fuente de energía para el calentamiento del ACS es gas natural (no hay contribución solar al sistema de ACS).

5.1.4.2 Sistema de climatización

Como ya se ha comentado en el sub-apartado anterior, esta oficina no dispone de sistema de climatización.

5.1.4.3 Otras consideraciones

Las consideraciones a tener en cuenta a la hora de analizar los resultados de la oficina B4 son:

- Debido a no disponer de sistema de climatización, el consumo energético de calefacción y refrigeración es nulo. En consecuencia, a excepción de las medidas de mejora en iluminación, todos los resultados se analizan a partir de la reducción de demanda energética.
- En las medidas de mejoras de aislamiento de fachada en cámara de aire (medidas P9 a P22) se ha supuesto que el espesor de aislamiento introducido es el definido en el listado de medidas de mejora (esto es, 5 y 10 cm de aislante) independientemente del grosor inicial de la cámara de aire. De esta forma los resultados son aplicables a un rango más amplio de oficinas.
- No se han aplicado medidas de mejora de cubierta (medidas P35 a P40) puesto que no se dispone de cubierta. Solo hay un forjado que separa la oficina simulada con el local superior y como este último está climatizado, se supone que el forjado presenta un comportamiento adiabático.
- La medida de mejora de colocación de toldo articulado (P45) no se aplica puesto que la única abertura de la oficina tiene orientación norte.
- La medida de mejora del sistema de climatización (medidas S1) no se ha aplicado debido a la no existencia previa de este sistema.
- El recuperador de calor del sistema de ventilación (medida S2) se ha modelizado como si el caudal de ventilación se redujese acorde a la eficiencia estacional del nuevo recuperador (el programa Calener VyP no puede modelizar recuperadores de calor con una eficiencia establecida por el usuario).
- Al no disponer de ascensor no se aplica la medida de sustitución del ascensor por uno más eficiente (medida S5).
- En el pack de medidas PQ1 no se han aplicado las medidas de aislamiento de cubierta (P35) así como la mejora de renovación del sistema de climatización (medida S1 según la oficina) debido a la no existencia de cubierta ni sistema de climatización.

5.1.5 Oficina de referencia B5

5.1.5.1 Descripción general

La oficina de referencia B5 es una oficina en edificio industrial ubicada en la Poble de Claramunt (Barcelona). Su superficie habitable es 428,8 m² y fue construida acorde a la NBE-CT-79. Desde el punto de vista energético, la oficina se encuentra en la zona climática C2, tiene una compactidad de 2,30 m³/m², las aberturas son de vidrio doble bajo emisivo, dispone de climatización (calefacción y refrigeración) y la fuente de energía para el calentamiento del ACS es electricidad (no hay contribución solar al sistema de ACS).

5.1.5.2 Sistema de climatización

El sistema de climatización está compuesto por 7 equipos de climatización:

Equipo	Nº unidades	Tipología	Potencia refrigeración (kW)	EER	Potencia calefacción (kW)	COP
B5-A	1	Autónomo aire-aire	6,0	4,51	6,8	4,20
B5-B	1	Autónomo aire-aire	10,0	3,20	11,2	3,41
B5-B	2	Autónomo aire-aire	5,0	3,85	6,0	4,41
B5-D	2	Autónomo aire-aire	10,0	3,62	11,2	3,94
B5-E	1	Autónomo aire-aire	6,1	3,37	6,8	4,07

Tabla 21. Resumen de equipos de climatización de la oficina B5.

5.1.5.3 Otras consideraciones

Las consideraciones a tener en cuenta a la hora de analizar los resultados de la oficina B5 son:

- Al no disponer de cerramientos con cámaras de aire, en las medidas de mejoras de aislamiento de fachada en la cámara de aire (medidas P9 a P22) se ha supuesto que el aislamiento se introduce en la parte interior del cerramiento (pero debajo del enlucido de yeso) para tener en cuenta el efecto de los puentes térmicos.
- Todas las medidas de mejora de cubierta (medidas P35 a P40) se han aplicado independientemente de que la cubierta sea plana o no. De esta forma los resultados también pueden ser aplicables a oficinas con cualquier tipología.
- La medida de mejora del sistema de climatización (medida S1) se ha aplicado solo en los equipos B5-B y B5-D porque el resto ya tienen una alta eficiencia.
- El recuperador de calor del sistema de ventilación (medida S2) se ha modelizado como si el caudal de ventilación se redujese acorde a la eficiencia estacional del nuevo recuperador (el programa Calener VyP no puede modelizar recuperadores de calor con una eficiencia establecida por el usuario).
- Al no disponer de ascensor no se aplica la medida de sustitución del ascensor por uno más eficiente (medida S5).

5.1.6 Oficina de referencia B6

5.1.6.1 Descripción general

La oficina de referencia B6 es un bloque de oficinas de tres plantas ubicado en Mollet del Vallès (Barcelona). Su superficie habitable es 1.724,2 m² y fue construido acorde al CTE. Desde el punto de vista energético, la oficina se encuentra en la zona climática C2, tiene una compacidad de 2,17 m³/m², las aberturas son de vidrio doble bajo emisivo, dispone de climatización (calefacción y refrigeración) y la fuente de energía para el calentamiento del ACS es electricidad (no hay contribución solar al sistema de ACS).

5.1.6.2 Sistema de climatización

El sistema de climatización está compuesto por un sistema VRF:

Equipo	Nº unidades	Tipología	Potencia refrigeración (kW)	EER	Potencia calefacción (kW)	COP
B6-A	1	VRF	228,0	4,15	259,5	4,70

Tabla 22. Resumen de equipos de climatización de la oficina B6.

5.1.6.3 Otras consideraciones

Las consideraciones a tener en cuenta a la hora de analizar los resultados de la oficina B6 son:

- En las medidas de mejoras de aislamiento de fachada en cámara de aire (medidas P9 a P22) se ha supuesto que el espesor de aislamiento introducido es el definido en el listado de medidas de mejora (esto es, 5 y 10 cm de aislante) independientemente del grosor inicial de la cámara de aire. De esta forma los resultados son aplicables a un rango más amplio de oficinas.
- Todas las medidas de mejora de cubierta (medidas P35 a P40) se han aplicado independientemente de que la cubierta sea plana o no. De esta forma los resultados también pueden ser aplicables a oficinas con cualquier tipología.
- Las medidas de intervención sobre los huecos con ventanas de doble vidrio (P41 y P43) no se han aplicado debido a la existencia previa de vidrio doble bajo emisivo que ya aporta más aislamiento térmico.
- La medida de renovación de las bombas de calor por otras de alta eficiencia (medidas S1) no se ha aplicado debido a la existencia previa de un sistema VRF (elevada eficiencia).
- El recuperador de calor del sistema de ventilación (medida S2) se ha modelizado como si el caudal de ventilación se redujese acorde a la eficiencia estacional del nuevo recuperador (el programa Calener VyP no puede modelizar recuperadores de calor con una eficiencia establecida por el usuario).

- En el pack de medidas PQ1 no se ha aplicado la medida de renovación del sistema de climatización (medida S1) debido a que la instalación inicial ya es eficiente.

5.1.7 Oficina de referencia B7

5.1.7.1 Descripción general

La oficina de referencia B7 es una oficina en un edificio industrial ubicado en Cervelló (Barcelona). Su superficie habitable es 89,0 m² y fue construida acorde a la NBE-CT-79. Desde el punto de vista energético, la oficina se encuentra en la zona climática C2, tiene una compacidad de 2,68 m³/m², las aberturas son de vidrio simple, dispone de climatización (calefacción y refrigeración) y la fuente de energía para el calentamiento del ACS es gas natural (no hay contribución solar al sistema de ACS).

5.1.7.2 Sistema de climatización

El sistema de climatización está compuesto por un equipo de climatización autónomo individual tipo aire-aire:

Equipo	Nº unidades	Tipología	Potencia refrigeración (kW)	EER	Potencia calefacción (kW)	COP
B7-A	1	Autónomo aire-aire	15,0	1,50	15,0	1,50

Tabla 23. Resumen de equipos de climatización de la oficina B7.

5.1.7.3 Otras consideraciones

Las consideraciones a tener en cuenta a la hora de analizar los resultados de la oficina B7 son:

- Al no disponer de cerramientos con cámaras de aire, en las medidas de mejoras de aislamiento de fachada en la cámara de aire (medidas P9 a P22) se ha supuesto que el aislamiento se introduce por la parte interior del cerramiento (pero debajo del enlucido de yeso) para tener en cuenta el efecto de los puentes térmicos.
- Todas las medidas de mejora de cubierta (medidas P35 a P40) se han aplicado independientemente de que la cubierta sea plana o no. De esta forma los resultados también pueden ser aplicables a oficinas con cualquier tipología.
- La medida de mejora de colocación de toldo articulado (P45) no se aplica puesto que la única abertura de la oficina tiene orientación norte.
- El recuperador de calor del sistema de ventilación (medida S2) se ha modelizado como si el caudal de ventilación se redujese acorde a la eficiencia estacional del nuevo recuperador (el programa Calener VyP no puede modelizar recuperadores de calor con una eficiencia establecida por el usuario).

- Al no disponer de ascensor no se aplica la medida de sustitución del ascensor por uno más eficiente (medida S5).

5.1.8 Resumen de los resultados

A continuación, se presenta la tabla con el resumen de ahorros energéticos en kWh/m²·año:

		Oficina representativa						
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Medida de mejora energética	P1	16,0	2,9	4,9	3,7	9,4	0,2	2,3
	P2	18,8	3,8	5,6	3,9	10,3	0,3	2,6
	P3	16,3	3,1	4,9	3,8	9,5	0,2	2,3
	P4	19,0	3,8	5,7	3,9	10,3	0,3	2,7
	P5	15,7	2,9	5,0	3,7	9,4	0,2	2,3
	P6	18,8	3,8	5,7	3,9	10,3	0,3	2,7
	P7	15,7	2,9	4,8	3,7	9,2	0,2	2,3
	P8	18,6	3,7	5,6	3,9	10,3	0,3	2,7
	P9	13,1	2,0	1,9	0,5	9,1	0,2	2,8
	P10	15,7	2,8	2,8	0,6	10,2	0,3	3,2
	P11	13,0	2,0	2,1	0,5	9,1	0,2	2,7
	P12	15,6	2,8	2,4	0,6	10,1	0,3	3,2
	P13	12,7	2,0	2,1	0,4	8,9	0,2	2,7
	P14	15,4	2,7	2,7	0,6	10,1	0,3	3,2
	P15	12,4	1,8	1,9	0,4	8,8	0,2	2,6
	P16	15,2	2,6	2,6	0,6	10,0	0,3	3,0
	P17	12,4	1,8	2,0	0,4	8,8	0,2	2,6
	P18	15,2	2,6	2,7	0,6	10,0	0,3	3,0
	P19	12,4	1,8	1,9	0,4	8,8	0,2	2,6
	P20	15,2	2,6	2,6	0,6	10,0	0,3	3,1
	P21	12,4	1,8	1,9	0,4	8,8	0,2	2,6
	P22	15,2	2,6	2,5	0,6	10,0	0,3	3,1
	P23	13,6	2,1	2,1	0,4	8,9	0,2	2,3
	P24	16,1	2,8	2,5	0,6	10,1	0,3	2,7
	P25	13,7	2,2	2,4	0,4	9,0	0,2	2,3
	P26	16,1	2,8	2,7	0,6	10,1	0,3	2,7
	P27	13,3	2,1	2,0	0,4	8,8	0,2	2,2
	P28	15,8	2,7	2,8	0,6	10,0	0,3	2,6
	P29	13,3	2,1	1,9	0,4	8,8	0,2	2,2
	P30	15,7	2,7	2,8	0,6	10,0	0,3	2,6
	P31	13,7	2,2	2,1	0,4	9,0	0,2	2,3
	P32	16,2	2,8	2,5	0,6	10,1	0,3	2,7



		Oficina representativa						
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
	P33	14,0	2,2	2,0	0,5	9,1	0,2	2,4
	P34	16,4	2,9	2,4	0,6	10,2	0,3	2,8
	P35	36,9	1,7	1,5	NA	2,0	0,6	8,8
	P36	39,3	1,9	1,5	NA	2,3	0,7	9,6
	P37	30,1	1,3	0,9	NA	1,3	0,4	5,8
	P38	36,3	1,7	1,5	NA	1,7	0,6	7,4
	P39	30,3	1,3	1,0	NA	1,3	0,4	5,8
	P40	36,4	1,7	1,5	NA	1,7	0,6	7,4
	P41	6,9	2,6	5,5	10,8	0,2	NA	0,7
	P42	7,1	3,8	7,8	14,5	0,2	NA	0,6
	P43	5,8	0,8	2,9	7,5	0,2	NA	0,5
	P44	5,9	1,8	5,5	11,1	0,2	NA	0,5
	P45	2,9	0,6	2,3	NA	0,1	0,5	NA
	P46	2,2	1,0	2,4	0,6	0,1	NA	0,0
	P47	0,5	0,1	0,1	1,2	0,0	0,1	0,0
	S1	NA	6,3	15,0	NA	3,7	NA	18,4
	S2	12,0	0,0	5,5	6,4	17,0	1,7	2,3
	S3	8,9	6,4	24,8	4,9	-0,8	9,4	18,0
	S4	3,8	2,6	10,3	2,1	-0,3	3,8	7,4
	S5	NA	4,0	5,3	NA	NA	1,8	NA
	T1	7,4	3,3	4,4	2,6	2,8	1,5	3,5
	T2	14,8	6,7	8,8	5,2	5,7	3,1	7,0
T3	29,6	13,4	17,5	10,3	11,3	6,1	14,0	
PQ1	73,8	18,3	15,8	23,7	24,0	3,1	23,1	
PQ2	11,4	7,4	26,1	6,2	-0,9	9,3	18,1	

Tabla 24. Resumen de ahorros energéticos en kWh/m²-año según medida de mejora energética y oficina representativa para el caso de bloques de oficinas y oficinas en edificios industriales.

5.2 Oficinas en edificios residenciales

A continuación, se adjuntan los resultados obtenidos de la simulación de los edificios de referencia y la aplicación de las distintas medidas de rehabilitación energética mediante el programa CE3X de oficinas en edificios residenciales.

5.2.1 Oficina de referencia R1

5.2.1.1 Descripción general

La oficina de referencia R1 es una oficina en residencial ubicada en Manresa (Barcelona). Su superficie habitable es 127,0 m² y fue construida con anterioridad al año 1980. Desde el punto de vista energético, la oficina se encuentra en la zona climática D2, tiene una compacidad de 2,96 m³/m², las aberturas son de vidrio simple, dispone de climatización (calefacción y refrigeración) y la fuente de energía para el calentamiento del ACS es electricidad (no hay contribución solar al sistema de ACS).

5.2.1.2 Sistema de climatización

El sistema de climatización está compuesto por un equipo de climatización autónomo individual tipo aire-aire:

Equipo	Nº unidades	Tipología	Potencia refrigeración (kW)	EER	Potencia calefacción (kW)	COP
R1-A	1	Autónomo aire-aire	8,0	1,50	8,0	1,50

Tabla 25. Resumen de equipos de climatización de la oficina R1.

5.2.1.3 Otras consideraciones

Las consideraciones a tener en cuenta a la hora de analizar los resultados de la oficina R1 son:

- En las medidas de mejoras de aislamiento de fachada en cámara de aire (medidas P9 a P22) se ha supuesto que el espesor de aislamiento introducido es el definido en el listado de medidas de mejora (esto es, 5 y 10 cm de aislante) independientemente del grosor inicial de la cámara de aire. De esta forma los resultados son aplicables a un rango más amplio de oficinas.
- No se han aplicado medidas de mejora de cubierta (medidas P37 a P40) puesto que no se dispone de cubierta. Solo hay un forjado que separa la oficina simulada con el local superior y como este último está climatizado, se supone que el forjado presenta un comportamiento adiabático.
- La medida de mejora de colocación de toldo articulado (P45) no se aplica puesto que la única abertura de la oficina tiene orientación norte.

5.2.2 Oficina de referencia R2

5.2.2.1 Descripción general

La oficina de referencia R2 es una oficina en residencial ubicada en Barcelona (Barcelona). Su superficie habitable es 22,2 m² y fue construida con anterioridad al año 1980. Desde el punto de vista energético, la oficina se encuentra en la zona climática C2, tiene una compacidad de 3,80 m³/m², las aberturas son de vidrio simple, no dispone de climatización, y la fuente de energía para el calentamiento del ACS es GLP (no hay contribución solar al sistema de ACS).

5.2.2.2 Sistema de climatización

Como ya se ha comentado en el sub-apartado anterior, esta oficina no dispone de sistema de climatización.

5.2.2.3 Otras consideraciones

Las consideraciones a tener en cuenta a la hora de analizar los resultados de la oficina R2 son:

- Al no disponer de cerramientos con cámaras de aire, en las medidas de mejoras de aislamiento de fachada en la cámara de aire (medidas P9 a P22) se ha supuesto que el aislamiento se introduce en la parte interior del cerramiento (pero debajo del enlucido de yeso) para tener en cuenta el efecto de los puentes térmicos.
- No se han aplicado medidas de mejora de cubierta (medidas P37 a P40) puesto que no se dispone de cubierta. Solo hay un forjado que separa la oficina simulada con el local superior y como este último está climatizado, se supone que el forjado presenta un comportamiento adiabático.
- La medida de mejora del sistema de climatización (medida S1) no se ha aplicado debido a la no existencia previa de este sistema.
- En el pack de medidas PQ1 no se ha aplicado la medida de renovación del sistema de climatización (medida S1) debido a la no existencia previa del sistema.

5.2.3 Oficina de referencia R3

5.2.3.1 Descripción general

La oficina de referencia R3 es una oficina en residencial ubicada en Barcelona (Barcelona). Su superficie habitable es 93,0 m² y fue construida con anterioridad al año 1980. Desde el punto de vista energético, la oficina se encuentra en la zona climática C2, tiene una compacidad de 2,86 m³/m², las aberturas son de vidrio simple, dispone de climatización (calefacción y refrigeración) y la fuente de energía para el calentamiento del ACS es electricidad (no hay contribución solar al sistema de ACS).

5.2.3.2 Sistema de climatización

El sistema de climatización está compuesto por un equipo de climatización autónomo individual tipo aire-aire y un equipo de calefacción por efecto Joule:

Equipo	Nº unidades	Tipología	Potencia refrigeración (kW)	EER	Potencia calefacción (kW)	COP
R3-A	1	Autónomo aire-aire	6,0	4,17	6,0	4,10
R3-B	1	Efecto Joule	-	-	3,0	1,0

Tabla 26. Resumen de equipos de climatización de la oficina R3.

5.2.3.3 Otras consideraciones

Las consideraciones a tener en cuenta a la hora de analizar los resultados de la oficina R3 son:

- En las medidas de mejoras de aislamiento de fachada en cámara de aire (medidas P9 a P22) se ha supuesto que el espesor de aislamiento introducido es el definido en el listado de medidas de mejora (esto es, 5 y 10 cm de aislante) independientemente del grosor inicial de la cámara de aire. De esta forma los resultados son aplicables a un rango más amplio de oficinas.
- No se han aplicado medidas de mejora de cubierta (medidas P37 a P40) puesto que no se dispone de cubierta. Solo hay un forjado que separa la oficina simulada con el local superior y como este último está climatizado, se supone que el forjado presenta un comportamiento adiabático.
- La medida de mejora del sistema de climatización (medida S1) se ha aplicado solo en el equipo R3-B porque el R3-A ya tiene una alta eficiencia.

5.2.4 Oficina de referencia R4

5.2.4.1 Descripción general

La oficina de referencia R4 es una oficina en residencial ubicada en Sabadell (Barcelona). Su superficie habitable es 33,7 m² y fue construida acorde a la NBE-CT-79. Desde el punto de vista energético, la oficina se encuentra en la zona climática C2, tiene una compacidad de 2,55 m³/m², las aberturas son de vidrio doble, dispone de climatización (calefacción y refrigeración) y la fuente de energía para el calentamiento del ACS es electricidad (no hay contribución solar al sistema de ACS).

5.2.4.2 Sistema de climatización

El sistema de climatización está compuesto por un equipo de climatización autónomo individual tipo aire-aire:

Equipo	Nº unidades	Tipología	Potencia refrigeración (kW)	EER	Potencia calefacción (kW)	COP
R4-A	1	Autónomo aire-aire	3,2	2,50	3,2	2,70

Tabla 27. Resumen de equipos de climatización de la oficina R4.

5.2.4.3 Otras consideraciones

Las consideraciones a tener en cuenta a la hora de analizar los resultados de la oficina R4 son:

- En las medidas de mejoras de aislamiento de fachada en cámara de aire (medidas P9 a P22) se ha supuesto que el espesor de aislamiento introducido es el definido en el listado de medidas de mejora (esto es, 5 y 10 cm de aislante) independientemente del grosor inicial de la cámara de aire. De esta forma los resultados son aplicables a un rango más amplio de oficinas.
- No se han aplicado medidas de mejora de cubierta (medidas P37 a P40) puesto que no se dispone de cubierta. Solo hay un forjado que separa la oficina simulada con el local superior y como este último está climatizado, se supone que el forjado presenta un comportamiento adiabático.

5.2.5 Oficina de referencia R5

5.2.5.1 Descripción general

La oficina de referencia R5 es una oficina en residencial ubicada en Ripollet (Barcelona). Su superficie habitable es 64,7 m² y fue construida acorde a la NBE-CT-79. Desde el punto de vista energético, la oficina se encuentra en la zona climática C2, tiene una compacidad de 2,04 m³/m², las aberturas son de vidrio doble, dispone de climatización (calefacción y refrigeración) y la fuente de energía para el calentamiento del ACS es electricidad (no hay contribución solar al sistema de ACS).

5.2.5.2 Sistema de climatización

El sistema de climatización está compuesto por un equipo de climatización autónomo individual tipo aire-aire:

Equipo	Nº unidades	Tipología	Potencia refrigeración (kW)	EER	Potencia calefacción (kW)	COP
R5-A	1	Autónomo aire-aire	2,8	2,00	2,8	2,20

Tabla 28. Resumen de equipos de climatización de la oficina R5.

5.2.5.3 Otras consideraciones

Las consideraciones a tener en cuenta a la hora de analizar los resultados de la oficina R5 son:

- En las medidas de mejoras de aislamiento de fachada en cámara de aire (medidas P9 a P22) se ha supuesto que el espesor de aislamiento introducido es el definido en el listado de medidas de mejora (esto es, 5 y 10 cm de aislante) independientemente del grosor inicial de la cámara de aire. De esta forma los resultados son aplicables a un rango más amplio de oficinas.

5.2.6 Oficina de referencia R6

5.2.6.1 Descripción general

La oficina de referencia R6 es una oficina en residencial ubicada en Barcelona (Barcelona). Su superficie habitable es 42,3 m² y fue construida con anterioridad al año 1980. Desde el punto de vista energético, la oficina se encuentra en la zona climática C2, tiene una compacidad de 12,44 m³/m², las aberturas son de vidrio simple, dispone de climatización (calefacción y refrigeración) y la fuente de energía para el calentamiento del ACS es electricidad (no hay contribución solar al sistema de ACS).

5.2.6.2 Sistema de climatización

El sistema de climatización está compuesto por un equipo de climatización autónomo individual tipo aire-aire:

Equipo	Nº unidades	Tipología	Potencia refrigeración (kW)	EER	Potencia calefacción (kW)	COP
R6-A	1	Autónomo aire-aire	4,0	2,53	4,0	2,47

Tabla 29. Resumen de equipos de climatización de la oficina R6.

5.2.6.3 Otras consideraciones

Las consideraciones a tener en cuenta a la hora de analizar los resultados de la oficina R6 son:

- Al no disponer de cerramientos con cámaras de aire, en las medidas de mejoras de aislamiento de fachada en la cámara de aire (medidas P9 a P22) se ha supuesto que el aislamiento se introduce en la parte interior del cerramiento (pero debajo del enlucido de yeso) para tener en cuenta el efecto de los puentes térmicos.
- No se han aplicado medidas de mejora de cubierta (medidas P37 a P40) puesto que no se dispone de cubierta. Solo hay un forjado que separa la oficina simulada con el local superior y como este último está climatizado, se supone que el forjado presenta un comportamiento adiabático.

5.2.7 Oficina de referencia R7

5.2.7.1 Descripción general

La oficina de referencia R7 es una oficina en residencial ubicada en Sant Feliu de Llobregat (Barcelona). Su superficie habitable es 401,6 m² y fue construida acorde a la NBE-CT-79. Desde el punto de vista energético, la oficina se encuentra en la zona climática C2, tiene una compacidad de 6,17 m³/m², las aberturas son de vidrio doble, dispone de climatización (calefacción y refrigeración) y la fuente de energía para el calentamiento del ACS es electricidad (no hay contribución solar al sistema de ACS).

5.2.7.2 Sistema de climatización

El sistema de climatización está compuesto por 4 equipos de climatización autónomos individuales tipo aire-aire:

Equipo	Nº unidades	Tipología	Potencia refrigeración (kW)	EER	Potencia calefacción (kW)	COP
R7-A	2	Autónomo aire-aire	14,6	2,50	14,6	2,90
R7-B	1	Autónomo aire-aire	27,5	2,88	27,5	3,09
R7-C	1	Autónomo aire-aire	4,0	3,71	4,0	4,16

Tabla 30. Resumen de equipos de climatización de la oficina R7.

5.2.7.3 Otras consideraciones

Las consideraciones a tener en cuenta a la hora de analizar los resultados de la oficina R7 son:

- En las medidas de mejoras de aislamiento de fachada en cámara de aire (medidas P9 a P22) se ha supuesto que el espesor de aislamiento introducido es el definido en el listado de medidas de mejora (esto es, 5 y 10 cm de aislante) independientemente del grosor inicial de la cámara de aire. De esta forma los resultados son aplicables a un rango más amplio de oficinas.
- No se han aplicado medidas de mejora de cubierta (medidas P37 a P40) puesto que no se dispone de cubierta. Solo hay un forjado que separa la oficina simulada con el local superior y como este último está climatizado, se supone que el forjado presenta un comportamiento adiabático.
- La medida de mejora de colocación de toldo articulado (P45) no se aplica puesto que la única abertura de la oficina tiene orientación norte.
- La medida de mejora del sistema de climatización (medida S1) se ha aplicado solo en los equipos R7-A y R7-B porque el R7-C ya tiene una alta eficiencia.

5.2.8 Oficina de referencia R8

5.2.8.1 Descripción general

La oficina de referencia R8 es una oficina en residencial ubicada en Barcelona (Barcelona). Su superficie habitable es 172,0 m² y fue construida con anterioridad al año 1980. Desde el punto de vista energético, la oficina se encuentra en la zona climática C2, tiene una compacidad de 3,71 m³/m², las aberturas son de vidrio simple, dispone de climatización (calefacción y refrigeración) y la fuente de energía para el calentamiento del ACS es gas natural (no hay contribución solar al sistema de ACS).

5.2.8.2 Sistema de climatización

El sistema de climatización está compuesto por un equipo de climatización autónomo individual tipo aire-aire:

Equipo	Nº unidades	Tipología	Potencia refrigeración (kW)	EER	Potencia calefacción (kW)	COP
R8-A	1	Autónomo aire-aire	10,0	1,50	10,0	1,50

Tabla 31. Resumen de equipos de climatización de la oficina R8.

5.2.8.3 Otras consideraciones

Las consideraciones a tener en cuenta a la hora de analizar los resultados de la oficina R8 son:

- Al no disponer de cerramientos con cámaras de aire, en las medidas de mejoras de aislamiento de fachada en la cámara de aire (medidas P9 a P22) se ha supuesto que el aislamiento se introduce en la parte interior del cerramiento (pero debajo del enlucido de yeso) para tener en cuenta el efecto de los puentes térmicos.
- No se han aplicado medidas de mejora de cubierta (medidas P37 a P40) puesto que no se dispone de cubierta. Solo hay un forjado que separa la oficina simulada con el local superior y como este último está climatizado, se supone que el forjado presenta un comportamiento adiabático.

5.2.9 Oficina de referencia R9

5.2.9.1 Descripción general

La oficina de referencia R9 es una oficina en residencial ubicada en Sant Joan Despí (Barcelona). Su superficie habitable es 266,0 m² y fue construida acorde al CTE. Desde el punto de vista energético, la oficina se encuentra en la zona climática C2, tiene una compacidad de 2,85 m³/m², las aberturas son de vidrio doble, dispone de climatización (calefacción y refrigeración) y la fuente de energía para el calentamiento del ACS es electricidad (hay un 60% de contribución solar al sistema de ACS y un 40% de contribución solar al sistema de calefacción).

5.2.9.2 Sistema de climatización

El sistema de climatización está compuesto por un equipo de climatización autónomo individual tipo aire-aire:

Equipo	Nº unidades	Tipología	Potencia refrigeración (kW)	EER	Potencia calefacción (kW)	COP
R9-A	1	Autónomo aire-aire	15,0	2,00	15,0	2,20

Tabla 32. Resumen de equipos de climatización de la oficina R9.

5.2.9.3 Otras consideraciones

Las consideraciones a tener en cuenta a la hora de analizar los resultados de la oficina R9 son:

- En las medidas de mejoras de aislamiento de fachada en cámara de aire (medidas P9 a P22) se ha supuesto que el espesor de aislamiento introducido es el definido en el listado de medidas de mejora (esto es, 5 y 10 cm de aislante) independientemente del grosor inicial de la cámara de aire. De esta forma los resultados son aplicables a un rango más amplio de oficinas.
- No se han aplicado medidas de mejora de cubierta (medidas P37 a P40) puesto que no se dispone de cubierta. Solo hay un forjado que separa la oficina simulada con el local superior y como este último está climatizado, se supone que el forjado presenta un comportamiento adiabático.
- La medida de mejora de colocación de toldo articulado (P45) no se aplica puesto que la única abertura de la oficina tiene orientación norte.



5.2.10 Resumen de los resultados

A continuación, se presenta la tabla con el resumen de ahorros energéticos en kWh/m²·año:

		Oficina representativa								
		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
Medida de mejora energética	P1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	P2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	P3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	P4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	P5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	P6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	P7	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	P8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	P9	4,5	18,4	15,8	0,3	0,4	1,3	0,6	1,1	1,6
	P10	5,4	22,1	19,0	0,4	0,5	1,6	0,6	1,2	2,0
	P11	4,4	18,2	15,7	0,3	0,4	1,3	0,6	1,1	1,6
	P12	5,4	21,9	18,9	0,4	0,5	1,5	0,6	1,2	2,0
	P13	4,3	17,9	15,4	0,3	0,3	1,3	0,5	1,0	1,5
	P14	5,3	21,6	18,7	0,4	0,5	1,5	0,6	1,2	2,0
	P15	4,2	17,4	14,9	0,3	0,3	1,3	0,5	1,0	1,5
	P16	5,2	21,2	18,4	0,4	0,5	1,5	0,6	1,2	1,9
	P17	4,2	17,4	14,9	0,3	0,3	1,3	0,5	1,0	1,5
	P18	5,2	21,2	18,4	0,4	0,5	1,5	0,6	1,2	1,9
	P19	4,2	17,4	14,9	0,3	0,3	1,3	0,5	1,0	1,5
	P20	5,2	21,2	18,4	0,4	0,5	1,5	0,6	1,2	1,9
	P21	4,2	17,4	14,9	0,3	0,3	1,3	0,5	1,0	1,5
	P22	5,2	21,2	18,4	0,4	0,5	1,5	0,6	1,2	1,9
	P23	4,6	18,2	15,8	0,3	0,4	1,3	0,6	1,0	1,6
	P24	5,4	21,8	18,9	0,4	0,5	1,5	0,6	1,2	2,0
	P25	4,6	18,2	15,8	0,3	0,4	1,3	0,6	1,0	1,6
	P26	5,4	21,8	18,9	0,4	0,5	1,5	0,6	1,2	2,0
	P27	4,4	17,8	15,4	0,3	0,4	1,3	0,5	1,0	1,5
	P28	5,3	21,4	18,6	0,4	0,5	1,5	0,6	1,2	2,0
	P29	4,4	17,8	15,4	0,3	0,4	1,3	0,5	1,0	1,5
	P30	5,3	21,4	18,6	0,4	0,5	1,5	0,6	1,2	2,0
	P31	4,6	18,2	15,8	0,3	0,4	1,3	0,6	1,0	1,6
	P32	5,4	21,8	18,9	0,4	0,5	1,5	0,6	1,2	2,0
	P33	4,4	17,8	15,4	0,3	0,4	1,3	0,5	1,0	1,5
	P34	5,3	21,4	18,6	0,4	0,5	1,5	0,6	1,2	2,0
	P35	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	P36	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	P37	NA	NA	NA	NA	1,3	NA	NA	NA	NA



		Oficina representativa								
		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
P38		NA	NA	NA	NA	2,1	NA	NA	NA	NA
P39		NA	NA	NA	NA	1,3	NA	NA	NA	NA
P40		NA	NA	NA	NA	2,1	NA	NA	NA	NA
P41		10,2	3,5	5,0	2,4	6,3	8,6	2,0	6,7	4,4
P42		13,0	4,6	6,6	3,8	8,7	8,6	2,8	8,1	5,8
P43		8,8	2,9	3,7	0,4	2,6	7,7	1,3	4,6	2,4
P44		11,5	3,7	4,8	1,6	5,6	8,5	2,1	6,2	5,0
P45		NA	1,0	1,0	8,2	15,4	9,3	NA	8,0	NA
P46		4,6	0,1	-0,5	1,1	4,7	5,1	0,8	2,6	2,8
P47		0,0	1,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,3	0,0	0,0
S1		24,2	NA	24,6	15,8	15,8	6,8	4,4	51,5	14,0
S2		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
S3		11,8	21,7	24,0	6,0	13,0	6,8	23,1	17,4	7,6
S4		4,7	15,9	18,7	2,5	5,5	2,8	9,4	12,8	3,1
S5		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
T1		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
T2		10,1	18,9	10,3	6,4	7,8	7,8	10,2	11,7	4,8
T3		20,1	37,8	20,6	12,7	15,7	15,6	20,4	23,3	9,6
PQ1		29,9	60,6	37,3	18,6	20,0	8,9	7,3	54,8	13,4
PQ2		16,9	24,1	22,5	7,2	17,3	11,4	24,6	19,6	10,1

Tabla 33. Resumen de ahorros energéticos en kWh/m²-año según medida de mejora energética y oficina representativa para el caso de oficinas en edificios residenciales.

6. Conclusiones

Los resultados alcanzados dentro de esta actividad incluyen la evaluación del ahorro energético derivado de la implementación de cada medida de rehabilitación energética en cada una de las tipologías edificatorias. Se han identificado los edificios de referencia en el parque de oficinas actual aplicando una metodología de segmentación con el algoritmo “k-means”. El impacto energético de las medidas identificadas en la Tarea 2 se ha cuantificado mediante la ejecución de simulaciones numéricas con las herramientas de certificación HULC (para bloques de oficinas y oficinas en edificios industriales) y CE3X (para oficinas en edificios residenciales). Para cada combinación posible de tipología y medida se ha presentado el resultado del ahorro previsto en kWh/m²-año.

7. Referencias



- [1] X. Gao, A. Malkawi, 2014. A new methodology for building energy performance benchmarking: An approach based on intelligent clustering algorithm, *Energy buildings* 84 607–616.
- [2] M. Halkidi, Y. Batistakis, M. Vazirgiannis, 2001. On clustering validation techniques, *Journal of Intelligent Information Systems* 17 (2) 107–145.
- [3] Comunidad de Madrid, 2017. Guía de ahorro y eficiencia energética en oficinas y despachos. [Consulta: 08 febrero 2019]. Disponible en: <<https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-Ahorro-y-Eficiencia-Energetica-en-Oficinas-y-Despachos-fenercom-2017.pdf>>.
- [4] Alves, S., Sendra, J.J., 2012. Rehabilitation and Energy efficiency - Methodological strategies for the Historic Centre of Oporto. In *Heritage 2012 - Proceedings of the 3rd International Conference Heritage and Sustainable Development*. (p. 395). Portugal: Green Lines Institute.
- [5] Comunidad de Madrid, 2016. Guía sobre Ahorro y Eficiencia Energética en Ascensores. [Consulta: 08 febrero 2019]. Disponible en: <<https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-sobre-Ahorro-y-Eficiencia-Energetica-en-Ascensores-fenercom-2016.pdf>>.
- [6] Ministerio de Fomento, 2018. Documento de Apoyo al Documento Básico, DB-HE Ahorro de energía, CTE. Cálculo de parámetros característicos de la envolvente [Consulta: 12 febrero 2019]. Disponible en: <http://www.apici.es/wp-download/legislacion/CTE/DA-DB-HE-1_-_Calculo_de_parametros_caracteristicos.pdf>.
- [7] European Environment Agency, 2013. European Environment Agency Technical Report No 5/2013, Achieving Energy Efficiency through Behavior Change: What Does it Take?
- [8] Yoon S., Kim S., Park G., Kim Y., Cho C., Park B., 2018. Multiple power-based building energy management system for efficient management of building energy. *Sustainable Cities and Society*, 42: 462-470.