



**Universidad  
Zaragoza**

## Trabajo Fin de Máster

Estudio de la incertidumbre de los resultados en la  
rehabilitación de un edificio de 8 apartamentos  
simulado en CYPETHERM HE Plus

Autor

Adrián Lacueva Palacín

Directora

Belén Zalba Nonay

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2023



# Estudio de la incertidumbre de los resultados en la rehabilitación de un edificio de 8 apartamentos simulado en CYPETHERM HE Plus

## RESUMEN

Actualmente, nos encontramos en un proceso de transición energética que exige la reducción de las demandas, la mejora de la eficiencia energética y la impulsión de las energías renovables. En este proyecto, la rehabilitación de los edificios es una pieza clave para la consecución de los objetivos.

Los estudios de rehabilitación energética de edificios pueden entrañar gran incertidumbre. En esta dirección se dirige este TFM, estudiando la influencia de la incertidumbre de los datos de entrada en los resultados de un modelo numérico en CYPETHERM HE Plus de un edificio de ocho apartamentos en un proceso de rehabilitación energética y su efecto en el riesgo de los inversores. Las actuaciones para realizar son la integración de una bomba de calor sustituyendo la caldera de gas y una instalación fotovoltaica en el tejado. Los datos de entrada se engloban en cinco categorías: factor humano, cerramientos y huecos, clima, equipos y sus características, y el precio de la energía. A través de 39 simulaciones, se estima la dispersión, respecto de una estimación base, de las demandas térmicas, y consumos térmicos y eléctricos. Tras la obtención de estos valores, se realiza un segundo análisis, económico, con el fin de dimensionar y conocer tanto la viabilidad económica del proyecto como el tiempo de retorno de la inversión realizada. Tras sendos estudios, se observa que el factor humano y el clima destacan por su gran influencia, y la existencia de una gran dispersión en el tiempo de amortización de las inversiones a realizar.

Para la consecución de los objetivos detallados, se realizan diversos estudios bibliográficos, que sirven como marco teórico y base para la realización del trabajo, para lo que se han consultado más de 80 referencias. Entre ellos destacan, una recopilación de la legislación europea y nacional concerniente, el desarrollo de las condiciones de contorno del modelo numérico, el desarrollo de las dos actuaciones a realizar: bombas de calor e instalación fotovoltaica, o los resultados de las simulaciones realizadas en el análisis de incertidumbre. Además, para la realización del estudio económico, se realiza un análisis del mercado referente al gas natural, la electricidad y la venta de excedentes fotovoltaicos junto a un análisis económico de las actuaciones a realizar, impuestos a pagar y las ayudas susceptibles a solicitar.

El trabajo se encuentra dividido en 3 capítulos. En el primero, se describe las premisas del estudio. En el segundo de ellos, se presenta el núcleo del estudio, el análisis de incertidumbre y sensibilidad llamados UA/SA del inglés “*Uncertainty and Sensitive Analysis*”, donde se detallan las variables a estudiar y su influencia en los resultados finales como las demandas o los consumos. En el tercer capítulo, con la dispersión en los resultados anteriormente obtenidos, se realiza un estudio económico de las actuaciones a realizar y el tiempo requerido para el retorno de la inversión. Finalmente, se presentan las conclusiones y las líneas futuras del trabajo. Además de lo citado, el trabajo posee seis anexos, donde se realizan diversos trabajos bibliográficos a los que se hace referencia a lo largo de la memoria y que incluyen información adicional sobre los temas tratados.



## Tabla de contenidos

Índice de ilustraciones.....	7
Índice de tablas.....	8
Índice de gráficos.....	11
INTRODUCCIÓN.....	13
Panorama normativo.....	14
Estado del arte de los estudios de incertidumbre y sensibilidad en la rehabilitación de edificios.....	15
OBJETIVOS.....	17
CAPTÍTULO I. PREMISAS DEL ESTUDIO.....	18
Modelo numérico.....	18
Rehabilitación energética.....	20
CAPÍTULO II. ANÁLIS DE INCERTIDUMBRE.....	22
Factor humano.....	23
Ocupación de la vivienda.....	23
Temperatura de consigna.....	25
Eficiencia de la iluminación y los aparatos eléctricos existentes.....	27
Ventilación.....	29
Otros.....	29
Cerramientos y huecos.....	29
Transmitancia térmica de las ventanas y lucernarios.....	29
Factor solar de los vidrios de las ventanas y lucernarios.....	30
Clima.....	31
Equipos y sus características.....	32
Efecto del clima en la bomba de calor y sistemas de refrigeración.....	32
Instalación fotovoltaica.....	33
Precio de la energía.....	34
Electricidad.....	34
Gas natural.....	35
Conclusiones preliminares.....	36
CAPITULO III. ESTUDIO ECONÓMICO.....	37
CONCLUSIONES.....	40
LÍNEAS FUTURAS.....	41
ANEXO I. LEGISLACIÓN.....	43
Normativa europea.....	43
Normativa española.....	44
ANEXO II. MODELIZACIÓN DEL EDIFICIO Y RESULTADOS PRELIMINARES.....	47
Introducción.....	47

Elección del programa.....	48
Modelización del edificio.....	49
Climatología.....	49
Demanda diaria de ACS.....	49
Temperaturas de consigna.....	49
Cerramientos.....	49
Huecos.....	49
Cargas térmicas.....	50
Sistemas de climatización.....	53
Demandas y consumos previos a la rehabilitación.....	54
ANEXO III. ELECCIÓN DE LOS SISTEMAS PARA CALEFACCIÓN Y ACS.....	57
Introducción.....	57
Aspectos medioambientales.....	57
Aspectos legales.....	60
Análisis de mercado.....	60
Elección de la bomba de calor.....	63
ANEXO IV. INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA.....	65
Introducción.....	65
Análisis de mercado.....	65
Legislación.....	65
Proyecto.....	66
ANEXO V. ESTUDIO DE LA INCERTIDUMBRE.....	68
Introducción.....	68
Estudios previos.....	68
Simulaciones.....	69
Factor humano.....	69
Clima.....	78
Cerramientos y huecos.....	80
Precio de la energía.....	81
Equipos y sus características.....	85
ANEXO VI. ESTUDIO ECONOMICO.....	89
Cuantificación de las inversiones a realizar.....	89
Precio de la energía.....	90
Desarrollo del estudio.....	92
BIBLIOGRAFÍA.....	94

## Índice de ilustraciones

*Ilustración 1. Hoja de ruta para la neutralidad climática [AIE][2]*

*Ilustración 2. Cronograma de la legislación europea y su transposición en normativa nacional española [Elaboración propia]*

*Ilustración 3. Número de estudios por año [2000-2017] de UA/SA [8]*

*Ilustración 4. Diagrama de flujo del Trabajo de Fin de Máster [Elaboración propia]*

*Ilustración 5. Casos de desocupación permanente de viviendas*

*Ilustración 6. Evolución del precio de la electricidad en los últimos 16 meses [Elaboración propia con los datos del **Sistema de Información del Operador del Sistema (e-sios)** de la Red Eléctrica de España]*

*Ilustración 7. Evolución del precio del gas natural respecto al índice del 4 de enero de 2021 [44]*

*Ilustración 8. Escalas de las demandas de calefacción y refrigeración en edificio de apartamentos y clima D3 en kWh/m<sup>2</sup>*

*Ilustración 9. Energía consumida global del edificio por meses y potencia diaria global del edificio requerida*

*Ilustración 10. Evolución y futuro de los fluidos refrigerantes [53]*

*Ilustración 11. Clasificación según uso [Elaboración propia]*

*Ilustración 12. Tipo de bomba de calor [Elaboración propia]*

*Ilustración 13. Clasificación según tipo de compresión [Elaboración propia]*

*Ilustración 14. Distribución según el refrigerante [Elaboración propia]*

*Ilustración 15. Distribución del uso de los refrigerantes por marca [Elaboración propia]*

*Ilustración 16. Disposición de los paneles fotovoltaicos sobre la cubierta orientada hacia el sur [Elaboración propia con SolarEdge]*

*Ilustración 17. Casos de desocupación permanente de viviendas*

*Ilustración 18. Evolución de la temperatura media anual de Zaragoza desde 1892, en color rojo, y media móvil de once años, en color negro [40]*

*Ilustración 19. Evolución del precio de la electricidad en los últimos 16 meses [Elaboración propia con los datos del **Sistema de Información del Operador del Sistema (e-sios)** de la Red Eléctrica de España]*

*Ilustración 20. Demandas de gas natural por región y su crecimiento respecto de la demanda de 2015 [72]*

*Ilustración 21. Evolución del precio del gas natural respecto al índice del 4 de enero de 2021 [44]*

*Ilustración 22. Precio del gas natural [44]*

*Ilustración 23. Curva de operación del inversor HUAWEI SUN2000-12KTL-M2 [Ficha técnica del inversor]*

*Ilustración 24. Curvas de rendimiento de MPPT [Ficha técnica de los paneles fotovoltaicos]*

## Índice de tablas

*Tabla 1. Categorías para la descarbonización del sector de la climatización y sus tecnologías según Abbasi et al. [5]*

*Tabla 2. Fuentes consultadas para la comprensión de las dificultades en la simulación térmica de edificios y la validación del programa utilizado*

*Tabla 3. Fuentes consultadas para la comprensión y posterior modificación del modelo numérico*

*Tabla 4. Consumos de electricidad y gas natural del edificio por conceptos*

*Tabla 5. Calificaciones energéticas de la calefacción, refrigeración, ACS y globales previas a la rehabilitación energética*

*Tabla 6. Fuentes consultadas para la situación y legislación vigente de la energía solar fotovoltaica*

*Tabla 7. Fuentes consultadas sobre el estado de las bombas de calor, sus aspectos medioambientales y legales, y comercialización*

*Tabla 8. Fuentes consultadas sobre análisis de incertidumbre*

*Tabla 9. Demandas de calefacción y refrigeración y su variación sobre el caso base estimado con los dos ficheros de datos meteorológicos descargados*

*Tabla 10. Rendimiento medio estacional y variación de este con los datos climáticos de la serie 2007-2021*

*Tabla 11. Pérdidas en la producción eléctrica de la instalación fotovoltaica sugerida*

*Tabla 12. Inversiones, impuestos, ayudas y bonificaciones de los sistemas a instalar*

*Tabla 13. Variables y su influencia en los tres casos de estudio*

*Tabla 14. Costes económicos para los tres casos de estudios*

*Tabla 15. Consumos y coste anuales del edificio previos a la rehabilitación bajo las condiciones de los tres casos*

*Tabla 16. Consumos, producción y coste anuales del edificio posteriores a la rehabilitación bajo las condiciones de los tres casos*

*Tabla 17. Tiempo de retorno de la inversión para cada uno de los casos con y sin subvenciones*

*Tabla 18. Transmitancia de los marcos según su material [17]*

*Tabla 19. Transmitancia y factor solar de los distintos tipos de vidrios [17]*

*Tabla 20. Tasa metabólica por persona según la actividad realizada [21]*

*Tabla 21. VEEI y Potencia máxima para zonas comunes y garaje del edificio*

*Tabla 22. Recomendación de iluminación según la estancia [19]*

*Tabla 23. Eficacia luminosa de diferentes tipos de bombillas [18]*

*Tabla 24. Fracción radiante y convectiva de los tipos de luminaria [20]*

*Tabla 25. Caudal de ventilación mínima exigida para viviendas*

*Tabla 26. Clase de eficiencia energética de sistemas de refrigeración de conducto único y su EER [Reglamento Delegado (UE) N.º 626/2011]*

*Tabla 27. Energía por metro cuadrado (kWh/m<sup>2</sup>-año) de calefacción necesaria por mes y en total en las viviendas*

*Tabla 28. Energía por metro cuadrado (kWh/m<sup>2</sup>-año) de refrigeración necesaria por mes y en total en las viviendas*

*Tabla 29. Consumos de electricidad y gas natural del edificio por conceptos*

*Tabla 30. Refrigerantes sustitutos y sus características más destacables*

*Tabla 31. Refrigerante y su potencial de calentamiento global [Elaboración propia]*

*Tabla 32. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración y su variación sobre el caso base estimado con variación del número de ocupantes permanentes en las viviendas*

*Tabla 33. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración ante la desocupación vertical de las viviendas*

*Tabla 34. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración ante la desocupación horizontal de las viviendas*

*Tabla 35. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración ante la desocupación mixta o zigzag de las viviendas*

*Tabla 36. Demandas térmicas anuales de los valores de temperatura de consigna de calefacción ante la variación sobre el caso base*

*Tabla 37. Demandas térmicas anuales de los valores de temperatura de consigna de refrigeración ante la variación sobre el caso base*

*Tabla 38. Demandas térmicas de los valores de temperatura de consigna de calefacción ante el apagado de la calefacción durante la noche*

*Tabla 39. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración y su variación sobre el caso base estimado con variación del tipo de iluminación y su eficiencia energética*

*Tabla 40. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración y su variación sobre el caso base estimado con variación de la eficiencia energética de los aparatos de las viviendas*

*Tabla 41. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración y su variación sobre el caso base estimado con variación del caudal de ventilación de las viviendas*

*Tabla 42. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración y su variación sobre el caso base estimado con los dos ficheros de datos meteorológicos descargados*

*Tabla 43. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración y su variación sobre el caso base ante la variación de la transmitancia térmica de los cerramientos acristalados*

*Tabla 44. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración y su variación sobre el caso base ante la variación del factor solar de los cerramientos acristalados*

*Tabla 45. Rendimiento medio estacional, consumo de electricidad anual y variación del consumo anual con los datos climáticos de la serie 2007-2021*

*Tabla 46. Presupuesto desglosado de la instalación fotovoltaica*

*Tabla 47. Tarifas del mercado español del gas natural, su precio variable y precio fijo sin IVA [48]*

*Tabla 48. Tarifas del mercado español de la electricidad, su precio variable y precio fijo sin IVA [46]*

*Tabla 49. Tarifas del mercado español con venta de excedentes [47]*

*Tabla 50. Variables y su influencia en los tres casos en estudio*

*Tabla 51. Consumos y coste anuales del edificio previos a la rehabilitación bajo las condiciones de los tres casos*

*Tabla 52. Consumos, producción y coste anuales del edificio posteriores a la rehabilitación bajo las condiciones de los tres casos*

*Tabla 53. Tiempo de retorno de la inversión para cada uno de los casos*

*Tabla 54. Tiempo de retorno de la inversión para cada uno de los casos sin subvenciones*

## Índice de gráficos

*Gráfico 1. Dispersión de la demanda térmica de calefacción, refrigeración y global respecto del caso base ante la variación del número de ocupantes permanentes*

*Gráfico 2. Variación de la demanda térmica de calefacción, refrigeración y global respecto de la demanda global base en cada uno de los casos de desocupación permanente*

*Gráfico 3. Dispersión de la demanda térmica de la calefacción respecto del caso base por la variación de la temperatura de consigna de la calefacción*

*Gráfico 4. Dispersión de la demanda térmica de la refrigeración respecto del caso base por la variación de la temperatura de consigna de la refrigeración*

*Gráfico 5. Dispersión de la demanda térmica de calefacción respecto a cada caso de temperatura de consigna antes el apagado nocturno de la calefacción*

*Gráfico 6. Variación de la demanda térmica de calefacción, refrigeración y global respecto de la demanda global base en cada uno de los casos de eficiencia de iluminación y de los aparatos eléctricos*

*Gráfico 7. Dispersión de la demanda térmica de calefacción, refrigeración y global respecto del caso base por la variación del número de renovaciones por hora de aire*

*Gráfico 8. Dispersión de la demanda térmica de calefacción, refrigeración y global respecto del caso base por la variación de la transmitancia térmica de las ventanas*

*Gráfico 9. Dispersión de la demanda térmica de calefacción, refrigeración y global respecto del caso base por la variación del factor solar de las ventanas*

*Gráfico 10. Límites superior e inferior de las estimaciones realizadas sobre las demandas térmicas de calefacción, refrigeración y global*

*Gráfico 11. Relación entre el COP con salida de agua a 65°C con la potencia de las máquinas para tipologías de aire-agua y agua-agua [Elaboración propia]*



# INTRODUCCIÓN

Actualmente, nos encontramos en un esfuerzo mundial hacia la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la reducción del calentamiento climático global. En esta dirección, diversos países trabajan en el seno de la Agencia Internacional de la Energía (AIE). Esta entidad formada por 30 países miembros, 8 países asociados y con la participación de la Unión Europea se creó en 1974, inicialmente, para coordinar una respuesta colectiva a los desajustes en el suministro del petróleo, pero, desde entonces, ha ampliado su actividad a la recomendación de políticas para favorecer la fiabilidad, asequibilidad y sostenibilidad de la energía.[1]

En línea con estas recomendaciones, la organización presentó en 2021 el camino a recorrer para la neutralidad climática en 2050 con el fin de favorecer la transición energética. Este objetivo se traslada en una apuesta por las renovables, el desuso de los combustibles fósiles y la electrificación de la energía hasta un 50% del total de consumo energético. En la siguiente figura, se observa un cronograma de las etapas y objetivos parciales a lograr con el fin de alcanzar la meta en 2050.[2]

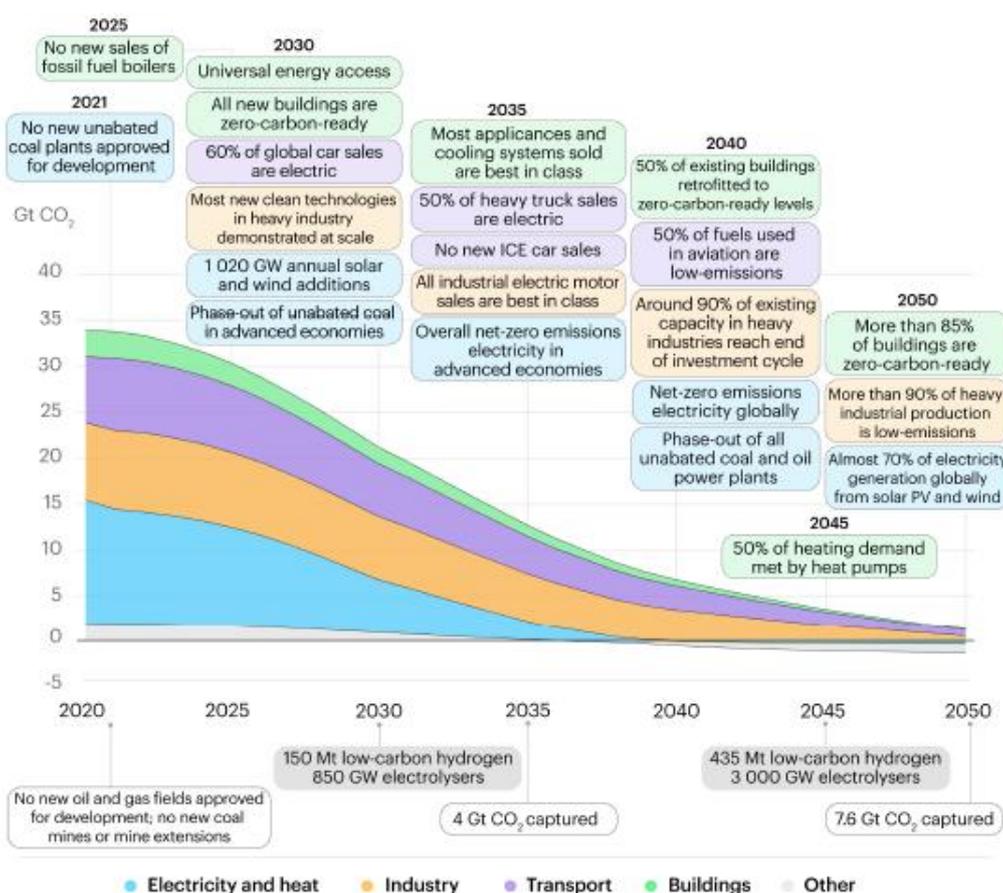


Ilustración 1. Hoja de ruta para la neutralidad climática [AIE][2]

El propio documento también indica los esfuerzos necesarios y la senda para realizar el cambio: inversiones en energía limpia anuales de 5 billones de dólares (tres veces más de lo invertido entre 2016 y 2020), quintuplicación de la energía solar y eólica actualmente instalada para 2030, expansión de los vehículos eléctricos o la inversión en tecnologías en desarrollo (aprox. el 45% de las tecnologías necesarias para la neutralidad en 2050 no están aún en el mercado).[2]

En línea con este objetivo, el Trabajo de Fin de Máster se centra en el sector doméstico de la Unión Europea. La Comisión Europea informa que los edificios suponen un 40% del consumo energético y el 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero de la Unión Europea. No obstante, estos grandes porcentajes se deben a que el 75% de los edificios comunitarios no son

energéticamente eficientes. Actualmente, el porcentaje de rehabilitación anual de los edificios es, alrededor, del 1%, ritmo que no permite la descarbonización del sector. Por esta razón, se espera duplicar el porcentaje anual con el fin de alcanzar la neutralidad climática.[3]

Con base a esto, la rehabilitación de los edificios se realiza en base a los siguientes tres preceptos y en orden descendente: [4]

- Reducción de la demanda energética de calefacción, refrigeración y/o agua caliente sanitaria.
- Mejora de la eficiencia de los sistemas y equipos, como los equipos de calefacción/refrigeración, electrodomésticos o la iluminación.
- Inclusión de energía renovables, como la fotovoltaica en los tejados y cubiertas.

Algunas sugerencias a estos preceptos son ofrecidas por **Abbasi et al. (2021)**[5] en cuestiones de climatización donde presenta cuatro categorías para la descarbonización del sector de la calefacción. En la siguiente ilustración, se muestran y se presentan algunas de las tecnologías aplicables.

Electrificación	Descarbonización de las redes de calor	Descarbonización de la red de gas	Tecnologías complementarias
-Bomba de calor -Almacenamiento en calentador -Calentadores eléctricos -Sistema híbrido	-Co-/Trigeneración -Bomba de calor -Planta geotérmica/biomasa -Incineración de residuos -Recuperación de calor residual	-Hidrógeno -Biometano -Gas sintético -Biogás -Mezcla de gases	-Térmica solar -Almacenamiento térmico -Almacenamiento y captura de carbono

Tabla 1. Categorías para la descarbonización del sector de la climatización y sus tecnologías según **Abbasi et al.** [5]

## Panorama normativo

En la dirección anteriormente citada, están trabajando los parlamentos y gobiernos europeos. Tomando como base el Trabajo de Fin de Grado realizado por **Santiago Palos Andreu** sobre los equipos comercialmente disponibles de bomba de calor por compresión en 2018 [6] y el Trabajo de Fin de Máster de **Jorge Roche Lázaro** sobre la caracterización a carga parcial de bombas de calor de gran potencia en redes de distrito de 2019 [7], se presenta la normativa y legislación vigente actualizada y ampliada a la fecha actual.

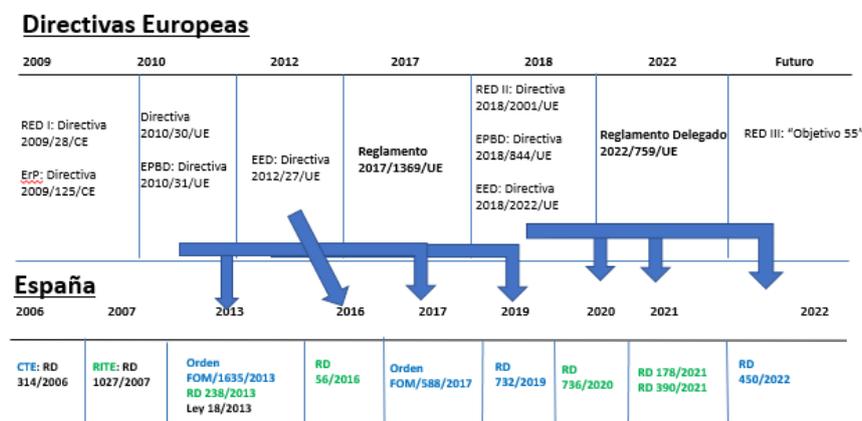


Ilustración 2. Cronograma de la legislación europea y su transposición en normativa nacional española [Elaboración propia]

Se puede observar una supeditación preponderante de la legislación emanada desde el Parlamento Europeo o de la Comisión Europea frente a la legislación española que se ciñe a la transposición mediante reales decretos leyes u órdenes ministeriales. No obstante, cabe destacar como legislación “propia” la **Ley 18/2013** de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas.

Para mayor detalle de las directivas, reglamentos, reales decretos leyes, leyes y órdenes ministeriales, se puede acudir al **ANEXO I**.

## **Estado del arte de los estudios de incertidumbre y sensibilidad en la rehabilitación de edificios**

Los estudios de incertidumbre y sensibilidad son llamados *UA/SA* del inglés “*Uncertainty and Sensitivity Analysis*”. A continuación, se detallan dos líneas de investigación muy interrelacionadas con la temática del Trabajo de Fin de Máster realizado.

En **Douglas-Smith et al. (2019)** [8] realizan un estudio bibliográfico donde se emplean 11.625 publicaciones de la base de datos de “Web of Science” con el fin de identificar las tendencias y direcciones de las investigaciones de los programas de simulación de UA/SA. Entre las limitaciones que se encuentran, destaca que algunos programas no presentan mantenimiento lo que provoca su obsolescencia. No obstante, la mayoría de ellos son de código abierto y gratuitos lo que facilita la compartición de los avances. A continuación, se muestra el apreciable aumento de este tipo de trabajos en los últimos 20 años.

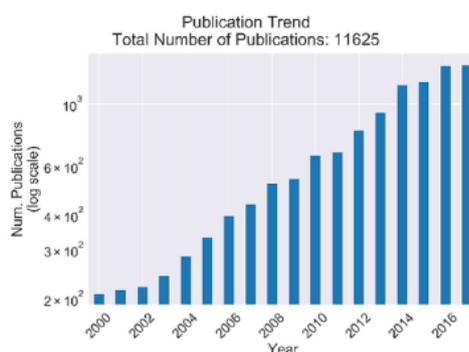


Ilustración 3. Número de estudios por año [2000-2017] de UA/SA [8]

Por otro lado, el grupo de **Carpino** de la universidad de Calabria estudian la reducción del riesgo en las inversiones de proyectos de rehabilitación de edificios. En el primero de sus estudios de **2022** [9], indica que todo resultado de una simulación es más “probabilístico” que “determinista” por la incertidumbre asociada. En base a esto realiza un estudio donde aplica *UA/SA* en un plan de rehabilitación energética de un edificio residencial público localizado en el área mediterránea. Inicialmente, se realizó un análisis de sensibilidad, hallándose como principales parámetros sensibles la eficiencia del sistema de refrigeración, la temperatura de consigna y la eficiencia de la instalación fotovoltaica. Cuando las acciones de mitigación del riesgo no se realizaban, la demanda de energía primaria anual se encontraba en el rango de 17.780-19.513 kWh y en solo el 22% de los casos el objetivo de diseño era alcanzado. Por otro lado, si las acciones de mitigación del riesgo se llevaban a cabo las posibilidades de alcanzar el objetivo de diseño aumentaba al 82% y las demandas de energía primaria anual se encontraba en un rango de 5.489-6.446 kWh. Algunas de las acciones mitigatorias son la elección de mejores equipos de refrigeración y fotovoltaicos, y la limitación de la temperatura de consigna 26°C como límite inferior en verano o 20°C como límite superior en invierno.

En el segundo estudio de **Carpino et al.** de **2022** [10], se presenta una metodología de diseño basada en la UA/SA que se pueda aplicar para reducir el riesgo de inversión. Esta metodología es aplicada a un caso de estudio de un edificio público residencial italiano considerando aspectos energéticos, económicos y medioambientales. Con los resultados obtenidos del análisis de incertidumbre y de sensibilidad, permiten realizar medidas correctoras que aumentan la tasa de éxito de la rehabilitación en un 60% y disminuyen las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 40%.

De forma resumida, el grupo de investigación de Carpino busca la identificación de las variables más sensibles, y que además presenten incertidumbre, y encontrar medidas correctoras durante la fase de diseño de proyectos de rehabilitación energética con el fin de reducir el riesgo de los inversores y afianzar la garantía de los resultados deseados.

## OBJETIVOS

El Trabajo de Fin de Máster nace de la lectura de estudios de rehabilitación y simulaciones basadas en ellos. En su desarrollo, se constata la gran influencia de la incertidumbre de los datos de entrada en los cálculos y en los resultados obtenidos. Constata la dispersión existente en las simulaciones numéricas de edificios o viviendas y con los conocimientos integrados, se procede a desarrollar un análisis de incertidumbre propio en un caso concreto, un edificio de ocho apartamentos al que se pretende realizar una rehabilitación energética, con el fin de cuantificar la influencia que la incertidumbre de los datos de entrada tiene en los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas. Además, se aprovecha para cuestionar la herramienta utilizada, CYPETHERM HE Plus, e incidir en la incertidumbre asociada a la producción eléctrica de una instalación fotovoltaica.

A continuación, se puede observar en un diagrama de flujo las diferentes partes del Trabajo de Fin de Máster.



Ilustración 4. Diagrama de flujo del Trabajo de Fin de Máster [Elaboración propia]

Los objetivos se pueden resumir brevemente en:

- Siendo conscientes de la incertidumbre existente y asociada a los datos de entrada, se realiza una estimación de su valor y se estudia su influencia, a través de las variables, en los resultados finales: demandas, consumos, rendimientos o el periodo de retorno de las inversiones, y su dispersión respecto a la estimación base.
- Analizar de forma crítica la herramienta utilizada, CYPETHERM HE Plus, a través de su comportamiento frente a datos de entrada diferentes, y sus capacidades y limitaciones a nivel de simulación numérica.
- En el seno de una rehabilitación energética, el plazo de amortización de la inversión es de vital importancia para la toma de la decisión. Por consiguiente, es importante realizar un análisis crítico de los resultados obtenidos, reflexionar sobre su veracidad y cuantificar la dispersión existente en el tiempo medio de retorno de las inversiones realizadas.

# CAPTÍTULO I. PREMISAS DEL ESTUDIO

## Modelo numérico

Se parte de un modelo numérico, incluido como ejemplo en el programa de CYPETHERM HE Plus, de un edificio compuesto por ocho apartamentos (seis estándar y dos dúplex) de seis alturas (planta baja y cinco plantas) que incluye zonas comunes (ascensor, rellanos y escaleras) y en cuya planta baja están ubicados los trasteros y el garaje.

La herramienta informática escogida, CYPETHERM HE Plus con motor de simulación de EnergyPlus 9.5, incluye la simulación térmica y la certificación energética según las indicaciones del Código Técnico de la Edificación y, adicionalmente, está reconocida por Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [11]. Para su validación y empleo en el trabajo, se consulta la “**Guía técnica de procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios**”[12] del **Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)**, donde se detalla la situación de los programas informáticos, sus capacidades y limitaciones; y se consultan documentación relativa a EnergyPlus 9.5 con el fin de conocer su funcionamiento dado que es la base del programa a utilizar, CYPETHERM HE Plus.

Además, se analiza el origen de las divergencias entre las simulaciones numéricas y los datos reales experimentales a través de la influencia de los hábitos de los ocupantes y/o el “Building Energy Performance Gap” (BEPG). Todo ello se encuentra recogido en el **ANEXO II**.

Fuente	Año	Aportaciones
Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [12]	2008	Estado del arte de los programas de simulación de instalaciones térmicas y comparativa entre ellos en cuestiones de cálculos, características y funcionalidades.
Van den Brom et al. [13]	2019	Estudio sobre la influencia del comportamiento humano en las demandas y consumos térmicos de viviendas de los Países Bajos y Dinamarca. El 50% de las variaciones son atribuibles al factor humano, siendo el restante atribuible al edificio .
Calì et al. [14]	2016	Estudio sobre la influencia del BEPG en la rehabilitación de edificios. Se rehabilitaron varios edificios, se simularon y se monitorizaron durante tres años. Los resultados experimentales de consumos anuales diferían en un 117%, 41% y 60% de lo simulado según el año.
Herrando et al. [15]	2016	Estudio sobre la influencia del BEPG en la certificación energética de edificios. Se simularon varios edificios de dos diferentes tipologías, docencia e investigación, de la Universidad de Zaragoza para su certificación energética. Al cotejar los resultados numéricos con los experimentales, se observó que existía una diferencia de un 30% en los relativos a docencia, por una mala implementación de la ocupación, y de un 45% en los de investigación, por la dificultad de modelizar los aparatos eléctricos existentes en ellos.

*Tabla 2. Fuentes consultadas para la comprensión de las dificultades en la simulación térmica de edificios y la validación del programa utilizado*

Respecto a las limitaciones presentes en el programa, destacan las que afectan al resultado y las que dificultan la simulación de las condiciones del modelo numérico.

- Afectan al resultado:
  - No es posible simular ventilación híbrida: natural y mecánica.
  - No dispone de simular el almacenamiento térmico, eléctrico o químico.

- Las opciones para la simulación de sistemas de climatización son escasas. Esta escasez es especialmente notable en el caso de las bombas de calor, donde solo es posible escoger entre algunos modelos de menos de una decena de marcas.
- Solamente acepta archivos climáticos EPW, lo que limita enormemente la introducción de datos climáticos.
- El programa dispone de la opción de incluir aportes de energía renovables, pero estos se reducen a un dato que se puede introducirse de forma anual o mensual.
- Dificultan la modelización del edificio:
  - No es fácil realizar un modelo 3D en el programa, siendo recomendable realizarlo en un software de diseño asistido para su importación.
  - El programa para la tipología de edificio estudiado, residencial privado en bloque, aplica de forma estática el Código Técnico de la Edificación, obligando al usuario, si se desea ajustar la simulación, a escoger la tipología de “Edificio de uso terciario” lo que no permite posteriormente el uso de la certificación energética, uso principal de la herramienta.

Como se comenta anteriormente el modelo numérico, el ejemplo ofrecido está basado en un edificio de obra nueva y aplica el Código Técnico de forma estática. Por consiguiente, es necesario realizar modificaciones con el fin de adaptarlo a un edificio con las prestaciones de anteriores normativas y disponer de las herramientas para poder modificar los valores de entrada al modelo numérico. Para la modificación de las cargas térmicas, ocupación, aparatos eléctricos e iluminación; la ventilación del edificio; las propiedades térmicas de huecos, ventanas y puertas; y la definición del modelo climático se realiza un estudio bibliográfico mediante la consulta del Código Técnico de la Edificación, guías del IDAE y otras fuentes. Todo ello se encuentra recogido en el **ANEXO II**.

<b>Fuente</b>	<b>Año</b>	<b>Aportaciones</b>
Documento Básico HE Ahorro Energético [16]	/	Modelización general de las condiciones de contorno del modelo numérico.
Guía IDAE Acristalamiento y cerramiento acristalado [17]	2019	Modelización de los vidrios y marcos de las ventanas y las puertas.
Guía IDAE Eficiencia energética en iluminación [18]	2020	Modelización de iluminación: tipologías de bombillas y sus características.
efectoLED [19]	2018	Modelización de iluminación: iluminancia recomendada.
Manual iMventa [20]	/	Modelización de iluminación: fracciones radiantes y convectivas.
Guía IDAE Climatización [21]	2012	Modelización de las condiciones recomendadas de ventilación y datos sobre la modelización de la ocupación.
Guía Gobierno de España evaluación de la eficiencia energética de los edificios [22]	2020	Modelización de ocupación: fracción radiante.

*Tabla 3. Fuentes consultadas para la comprensión y posterior modificación del modelo numérico*

Tras la introducción de todos los datos, se obtiene las demandas y los consumos térmicos y eléctricos existentes previos a la rehabilitación.

<b>Electricidad</b>		<b>Gas natural</b>	
<b>Concepto</b>	<b>Consumo [kWh/año]</b>	<b>Concepto</b>	<b>Consumo [kWh/año]</b>
Iluminación	17.994,50	Calefacción	33.937,12
Aparatos eléctricos	12.396,50	ACS	22.041,26
Bombas de circulación	1.685,80		
Sistemas de refrigeración	4.655,5		

*Tabla 4. Consumos de electricidad y gas natural del edificio por conceptos*

A nivel de calificación energética, son las siguientes.

	Calefacción	Refrigeración	ACS	Global
<b>Demanda térmica</b>	C	C	/	/
<b>Energía primaria</b>	C	C	G	C
<b>Emisiones CO<sub>2</sub></b>	B	B	G	C

Tabla 5. Calificaciones energéticas de la calefacción, refrigeración, ACS y globales previas a la rehabilitación energética

En cuanto a los equipos existentes en el edificio, existen dos calderas de condensación, cada una con una potencia de 20 kW, alimentadas con gas natural que suministran las demandas térmicas necesarias para la calefacción y el ACS. La demanda térmica de refrigeración se satisface mediante sistemas de expansión directa aire-aire tipo split individuales, en cada una de las viviendas con EER 2,70. Los ratios de potencia instalada para calefacción y refrigeración son, respectivamente, alrededor de 46 W/m<sup>2</sup> y 23 W/m<sup>2</sup>.

## Rehabilitación energética

Se asume que la vivienda ha sido rehabilitada previamente con el fin de reducir las demandas energéticas, primera premisa de la mejora de la eficiencia energética. En base a esta premisa se sugiere una segunda rehabilitación, esta vez dirigida hacia la mejora de la eficiencia de los sistemas y equipos, y a la inclusión de energías renovables en el edificio. Dado el carácter colectivo de la Comunidad de Propietarios, se deciden emprender dos inversiones que afectarán positivamente en la reducción de los consumos de todas las viviendas.

### – Instalación fotovoltaica en el tejado del edificio

Antes de dimensionar la instalación fotovoltaica, se realiza un estudio bibliográfico para conocer la situación actual de la energía solar, especialmente la fotovoltaica; la legislación existente en España y las ayudas al autoconsumo. Tras ello, se sugiere la instalación de 30 paneles fotovoltaicos de 460 Wp en toda la cubierta sur del edificio. La potencia instalada total será de 13,80 kW y la potencia nominal de 12 kW debido a la instalación de un inversor trifásico central de 12 kW.

Fuente	Año	Aportaciones
Agencia Internacional de la Energía [23], [24]	2022	Situación mundial actual de la fotovoltaica, crecimiento y futuro.
Comisión Europea [25], [26]	2022	Situación europea actual de la fotovoltaica, crecimiento, expectativas y futuro.
Red Eléctrica de España [27]	2022	Situación española de la energía solar a nivel de potencia instalada.
Real Decreto 900/2015	2015	Aprobación y derogación del impuesto al sol.
Real Decreto Ley 15/2018	2018	
Real Decreto 244/2019	2019	Aprobación de las condiciones del autoconsumo y la venta de excedentes.
Real Decreto 477/2021	2021	Ayudas al autoconsumo de energías renovables, solar y eólica.
Real Decreto 377/2022	2022	

Tabla 6. Fuentes consultadas para la situación y legislación vigente de la energía solar fotovoltaica

Algunos de los beneficios de la actuación serán la instalación de una fuente de energía sin emisiones directas de CO<sub>2</sub> y gratuita. Por otro lado, reducirá los consumos eléctricos de las zonas comunes y las viviendas cuando exista superávit.

- *Sustitución de las calderas de gas natural por una bomba de calor que supla los consumos de calefacción y de ACS*

Con el fin de comprender y analizar de la forma más correcta la sustitución de las calderas de gas, se realiza un estudio bibliográfico sobre las bombas de calor. Se inicia por una búsqueda sobre los diferentes focos de extracción de energía, los aspectos medioambientales y legales y un análisis de mercado. Con toda la información recabada y las opciones existentes en el programa informático, se sugiere la instalación de dos bombas de calor aire-agua de la marca **Midea** con una potencia individual de **30,10 kW**, un SCOP cercano a **2,60**, compresor rotatorio y un aumento de la ratio hasta **70,19 W/m<sup>2</sup>** por las variaciones en el SCOP. Para mayor detalle sobre el estudio realizado sobre las bombas de calor y el desarrollo de la elección y cálculo de sus prestaciones, se puede consultar el **ANEXO III**.

<b>Fuente</b>	<b>Año</b>	<b>Aportaciones</b>
Wang et al. [28]	2021	Estado del arte de las bombas de calor respecto a focos y tecnologías.
Paul Byrne [29]	2022	Estado del arte sobre los refrigerantes respecto a su utilización, idoneidad, características físicas y químicas, potencial de calentamiento global o acidificación, y su estado actual de comercialización.
Estudio Comisión Europea sobre nuevos refrigerantes [30]	2020	Estudio sobre el futuro de los refrigerantes en la Unión Europea a través de una comparativa de refrigerantes existentes y futuros teniendo en cuenta su potencial de calentamiento global, inflamabilidad, capacidad de fabricación y comercialización, y su desempeño térmico.
Ley 16/2013 Ley 6/2018 Ley 14/2022	2013 2018 2022	Legislación española concerniente al gravamen por la venta de refrigerantes según su potencial de calentamiento global.
Reglamento UE N.º 517/2014	2014	Legislación europea concerniente a la prohibición de pequeños aparatos que emplean refrigerantes con GWP's superiores a 750.
TFG Santiago Palos [6]	2018	Análisis del mercado de bombas de calor de potencia superior a 100 kW.
TFM Jorge Roche [7]	2019	Análisis del mercado de bombas de calor de potencia superior a 100 kW.
Catálogos Carrier, CIAT, Trane, AERMEC y Climaveneta	2022	Bombas de calor con potencia inferior a 100 kW.

*Tabla 7. Fuentes consultadas sobre el estado de las bombas de calor, sus aspectos medioambientales y legales, y comercialización*

Algunos de los beneficios de la actuación serán el aumento de la eficiencia respecto de los equipos existentes y la reducción del consumo energético global del edificio tanto a nivel final como primario. Además, se reducirán las emisiones de gases de efecto invernadero y parte de la energía eléctrica consumida provendrá de la instalación fotovoltaica.

## CAPÍTULO II. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

A diferencia de un estudio de sensibilidad, donde se estudia que variables de entrada influyen especialmente la salida, este estudio persigue conocer la influencia que pueden producir ciertas entradas, de las que no se conoce su valor exacto, en el valor final. De esta forma, una variable con gran sensibilidad puede no ser relevante en este estudio dado que su valor de entrada es conocido con precisión.[31] Por consiguiente, la intención de este tipo de análisis es hallar y estimar las variables con mayor incertidumbre asociada y que, además, influyan fuertemente en los resultados.

A continuación, se detallan las fuentes consultadas para la realización del análisis de incertidumbre propio posterior.

Fuente	Objeto	Aportaciones
<b>Macdonald (2022)</b> [31]	Cuantificar los efectos de la incertidumbre en las simulaciones de edificios.	Visión general sobre los análisis de incertidumbre.
<b>Domínguez et al. (2010)</b> [32]	Cálculo bajo incertidumbre de una carga punta de refrigeración de un edificio mediante el método de Montecarlo mediante la variación de veinte variables.	-Reflexión sobre variables con incertidumbre asociada. -Intervalo de confianza del 95% con una desviación de más del 15%.
<b>Koniarczyk et al. (2021)</b> [33]	Estudio sobre la influencia del número de ocupantes, la temperatura interior, la transmitancia térmica de las ventanas y el coeficiente de ganancia solar de las ventanas de un edificio de oficinas en la demanda térmica y el número de horas de confort térmico.	-El número de ocupantes y la temperatura interior tiene gran influencia en los datos estudiados, 10-20%. -La influencia de la transmitancia térmica y el coeficiente de ganancia solar de las ventanas es inferior, 1-5%.
<b>Amadeh et al. (2022)</b> [34]	Influencia en la flexibilidad de la demanda de un edificio residencial de la climatología y de la formulación de un modelo estocástico de control predictivo formulado por ellos, manteniendo el confort térmico de los ocupantes.	-Los resultados dependen de la temperatura de confort térmico de los ocupantes. -La influencia de la climatología es alta y condiciona el modelo predictivo.

Tabla 8. Fuentes consultadas sobre análisis de incertidumbre

En **Macdonald (2022)** [31], destaca la clasificación que realiza sobre los métodos para la cuantificación de la incertidumbre. Estos se pueden dividir en externos o internos. En los métodos externos, las matemáticas de la simulación no son alteradas; solo el modelo descriptivo, las condiciones iniciales, las condiciones de contorno o los métodos de resolución. Mientras que, en los métodos internos, se trata de estimar el error existente mediante métodos aritméticos.

Centrándonos en los métodos externos, se dividen en locales o globales. El mayor exponente de los primeros es el análisis de sensibilidad diferencial que se basa en la realización de una simulación inicial y, posteriormente, variar individualmente los valores a estudiar entre dos valores extremos, inferior y superior, con el fin de conocer la influencia de cada parámetro individualmente. No obstante, su principal debilidad es considerar que los efectos de estas incertidumbres son independientes a los demás parámetros. Con este fin, se puede realizar un

estudio factorial donde se realizan tantas simulaciones como combinaciones posibles existan con la intención de conocer las interacciones entre parámetros.

En el caso de los métodos externos globales, se basan en la variación de todos los valores considerados. Tiene tres métodos principales: diferencial, factorial y Montecarlo. Los dos primeros resultan ser parejos a los de los métodos locales añadiendo la realización de varias simulaciones con el fin de obtener una muestra aceptable estadísticamente.

El método de Montecarlo, además de incluir la repetición de la simulación, incluye también la distribución probabilística de cada una de las entradas de los parámetros. De esta manera, y si la probabilidad es conocida o intuida, es posible obtener valores más cercanos a la realidad. No obstante, su coste computacional es alto.

Por otro lado, los métodos internos representan los parámetros como función de la incertidumbre y altera los algoritmos de la herramienta de simulación con el fin de incluir la incertidumbre en todas las etapas computacionales. Presenta como ventaja que solo requiere de una simulación para cuantificar los efectos individuales y globales.

Dada la complejidad del modelo y su trasposición a una función es difícil y, por consiguiente, una aproximación por métodos internos no sería óptima. Por otro lado, la variación de las variables debe ser realizada de forma manual en el programa y, por consiguiente, métodos como el de Montecarlo o el factorial deben ser descartados. Finalmente, es necesario realizar el análisis de incertidumbre mediante el método diferencial puesto que permite de forma satisfactoria cuantificar el efecto de la incertidumbre de las variables.

Se realizan 39 simulaciones del conjunto del edificio con un coste computacional de 20-30 minutos por simulación. La variación de algunos datos como las ganancias térmicas por iluminación o por la ocupación permite realizarse de forma colectiva, es decir, modificando un único valor. Por el contrario, en el caso de las temperaturas de consigna o la desocupación ha sido necesario modificar todos los perfiles de uso para modificar el modelo numérico de forma individual.

Para más información, se puede consultar el **ANEXO V** donde se desarrolla con mayor profundidad los temas citados y los resultados, desarrollo y conclusiones de todas las siguientes simulaciones realizadas.

## **Factor humano**

El estudio de **van den Brom et al. (2019)** [13], donde se buscaban diferencias sobre qué parte de la variación entre el valor teórico y el valor real de consumo energético en una vivienda se podía atribuir a los ocupantes o al propio edificio, concluyó que el 50% de la variación en la calefacción entre dos viviendas se puede explicar por las diferencias relativas a los ocupantes. El otro 50% se puede explicar por las características del edificio y otros parámetros físicos que habitualmente no son tenidos en cuenta en los modelos numéricos. Adicionalmente, destacaba que la influencia de los ocupantes difiere dependiendo de las características del edificio, destacando que los edificios con mayor eficiencia energética se ven más influidos por los ocupantes.

## **Ocupación de la vivienda**

### Número de ocupantes permanentes

Las viviendas cuentan con tres dormitorios con una capacidad máxima de 2 ocupantes permanentes por dormitorio. Se estudian todos los casos posibles de número de ocupantes permanentes.

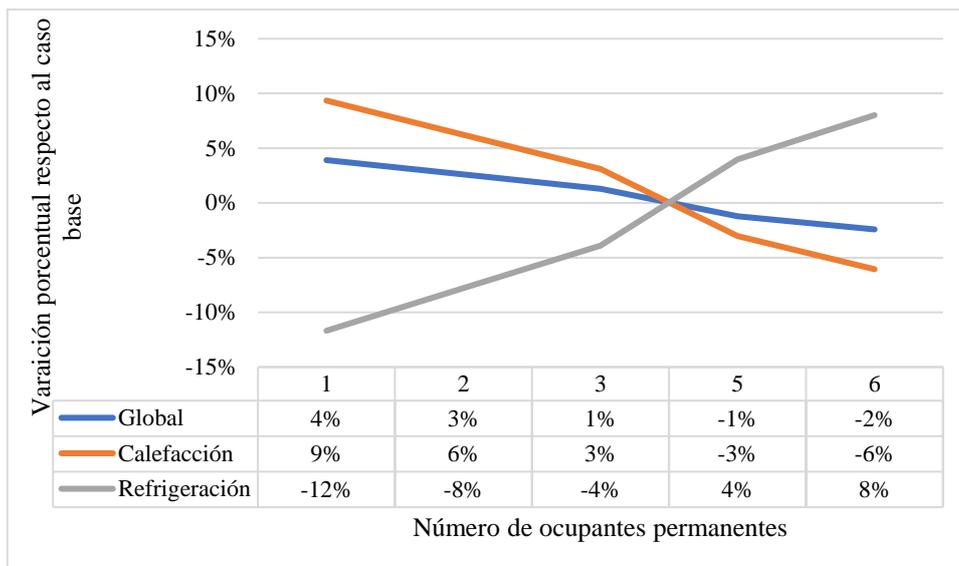


Gráfico 1. Dispersión de la demanda térmica de calefacción, refrigeración y global respecto al caso base ante la variación del número de ocupantes permanentes

Se observa que el aumento del número de ocupantes en la vivienda disminuye la demanda de calefacción e incrementa la demanda de refrigeración por los aportes térmicos de los ocupantes. No obstante, en la demanda térmica global la variación no es determinante, siendo su influencia no superior a un 4%. Este resultado se obtiene debido a la pequeña variación de la variable, número de ocupantes permanentes, y que los aportes son cuasi permanentes a diferencia, por ejemplo, de un edificio de oficinas.

#### Desocupación de las viviendas

En el **Censo de 2011** [35] del **Instituto Nacional de Estadística (INE)**, se recoge que del total de viviendas en España (25.208.623) 3.443.365 viviendas se encuentran vacías, suponiendo el 13,66% del total. En el caso de Zaragoza, este porcentaje se reduce al 10,70%. Por consiguiente, la influencia de la desocupación de las viviendas en el resto de las viviendas ocupadas en el edificio constituye una incertidumbre en las demandas térmicas de calefacción y refrigeración de los edificios. Para su cuantificación, se realizan diversos estudios con diferentes configuraciones de desocupación total de las viviendas, tanto vertical, horizontal y mixta.

#### Desocupación total vertical por letra

Caso 1		Caso 2	
4 <sup>o</sup> A	4 <sup>o</sup> B	4 <sup>o</sup> A	4 <sup>o</sup> B
3 <sup>o</sup> A	3 <sup>o</sup> B	3 <sup>o</sup> A	3 <sup>o</sup> B
2 <sup>o</sup> A	2 <sup>o</sup> B	2 <sup>o</sup> A	2 <sup>o</sup> B
1 <sup>o</sup> A	1 <sup>o</sup> B	1 <sup>o</sup> A	1 <sup>o</sup> B

#### Desocupación total horizontal por planta

Caso 3		Caso 4	
4 <sup>o</sup> A	4 <sup>o</sup> B	4 <sup>o</sup> A	4 <sup>o</sup> B
3 <sup>o</sup> A	3 <sup>o</sup> B	3 <sup>o</sup> A	3 <sup>o</sup> B
2 <sup>o</sup> A	2 <sup>o</sup> B	2 <sup>o</sup> A	2 <sup>o</sup> B
1 <sup>o</sup> A	1 <sup>o</sup> B	1 <sup>o</sup> A	1 <sup>o</sup> B

Caso 5		Caso 6	
4 <sup>o</sup> A	4 <sup>o</sup> B	4 <sup>o</sup> A	4 <sup>o</sup> B
3 <sup>o</sup> A	3 <sup>o</sup> B	3 <sup>o</sup> A	3 <sup>o</sup> B
2 <sup>o</sup> A	2 <sup>o</sup> B	2 <sup>o</sup> A	2 <sup>o</sup> B
1 <sup>o</sup> A	1 <sup>o</sup> B	1 <sup>o</sup> A	1 <sup>o</sup> B

### Desocupación total vertical por letra

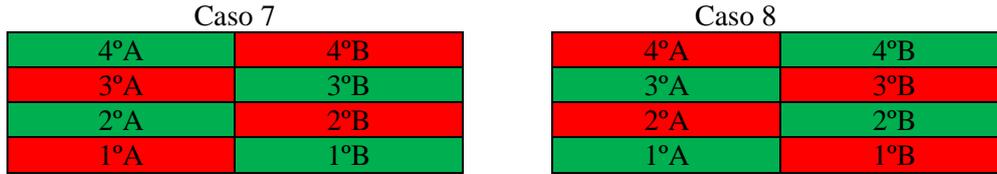


Ilustración 5. Casos de desocupación permanente de viviendas

En la Ilustración 5 se representa la ocupación de la vivienda con el color verde, mientras que la desocupación se representa con el color rojo.

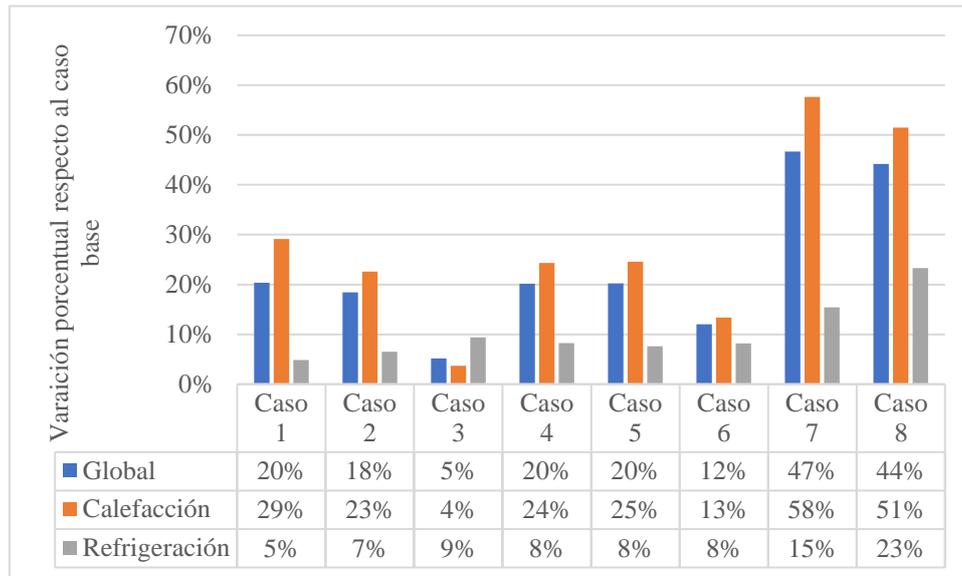


Gráfico 2. Variación de la demanda térmica de calefacción, refrigeración y global respecto de la demanda global base en cada uno de los casos de desocupación permanente

Como es esperable, la desocupación de algunas de las viviendas repercute en un aumento de las demandas térmicas tanto de calefacción como de refrigeración. Destaca en la desocupación horizontal que las demandas aumentan más considerablemente en el caso de la desocupación de las plantas intermedias, dado que las plantas 1ª o 4ª se ven sin recintos calefactados tanto en el suelo como en el techo. Por esta misma razón, se observa un aumento mucho más destacable en la configuración mixta frente a la vertical por encontrarse todas las viviendas con recintos no calefactados a su alrededor, aunque las viviendas desocupadas sean las mismas, cuatro.

### Temperatura de consigna

Se procede a estudiar la influencia de la temperatura de consigna en las demandas de calefacción y refrigeración en base a los datos recabados en la “**Encuesta de Hogares y Medio Ambiente**” [36] del año **2008**. Igualmente, se estudia el apagado de los sistemas durante la noche.

#### Modificación del termostato

Se procede a hacer tres simulaciones con la temperatura de consigna media de la encuesta (21°C), con un grado Celsius superior a la media y con un grado Celsius inferior al caso base. Las temperaturas de consigna indicadas se dan únicamente en las horas diurnas. En las horas nocturnas la temperatura de consigna es de 17°C en base a lo indicado en la *Tabla a-Anejo D* del **Documento Básico HE Ahorro de Energía**. [16]

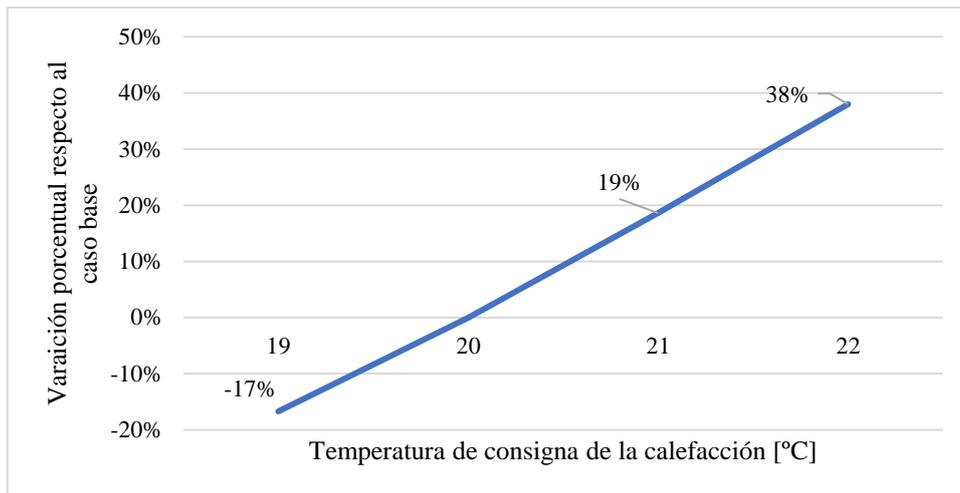


Gráfico 3. *Dispersión de la demanda térmica de la calefacción respecto del caso base por la variación de la temperatura de consigna de la calefacción*

De forma pareja, se realiza el mismo estudio en la temperatura de consigna de la refrigeración, siendo el número de simulaciones superior al encontrarse la temperatura de consigna del CTE y la de la encuesta (22°C) más distanciadas. Las temperaturas de consigna indicadas se dan únicamente en las horas diurnas durante las cuales el aire acondicionado está en funcionamiento. En las horas nocturnas la temperatura de consigna es de 27°C en base a lo indicado en *Tabla A-Anejo D del Documento Básico HE Ahorro de Energía*. [16]

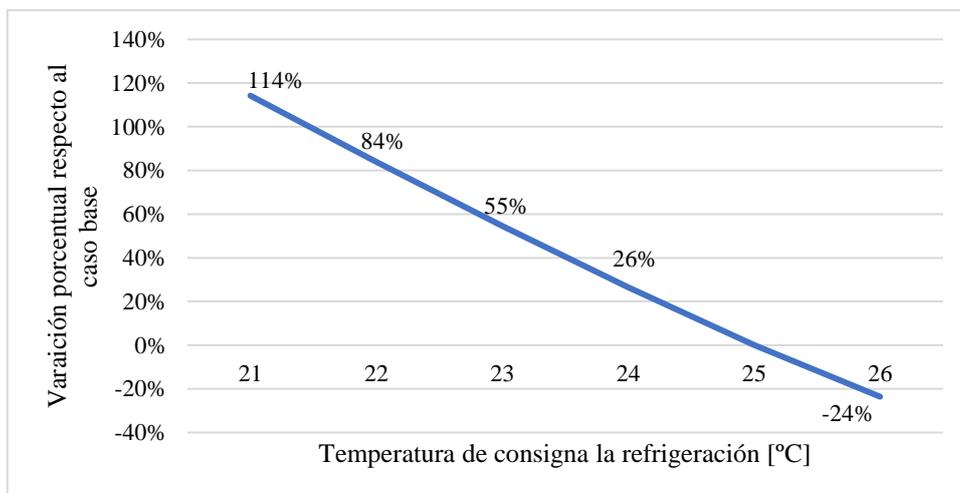


Gráfico 4. *Dispersión de la demanda térmica de la refrigeración respecto del caso base por la variación de la temperatura de consigna de la refrigeración*

Se observa que la influencia de la temperatura de consigna es muy importante y es un dato que presenta gran incertidumbre dado que los ocupantes pueden variar su valor tanto a lo largo del día como de un año a otro.

Además, la propia incertidumbre de medición de los sensores puede añadir mayor incertidumbre. En **Giraldo-Soto et al. (2022)** [37], se realiza un análisis de la incertidumbre en la medición de la temperatura interior en cuatro tipologías de edificios de oficinas con diferentes número de sensores térmicos, entre 5 y 19 sensores, posicionados en trípodes. El estudio analizaba la incertidumbre de la temperatura en las diferentes zonas y, de forma paralela, la estimación individual de la incertidumbre asociada al sensor de la temperatura, el error sistemático. Entre el resto de las incertidumbres asociadas se citan las características geométricas y espaciales de los

diferentes tipos de oficinas que pueden generar fluctuaciones aleatorias de la temperatura. En cuanto a los resultados, para la incertidumbre del sensor, se obtenía una dispersión de  $\pm 0,22^{\circ}\text{C}$ , mientras que para la incertidumbre global el valor ascendía a  $\pm 0,71-1,07^{\circ}\text{C}$ .

#### Apagado de los sistemas durante las noches

En algunas Comunidades de Propietarios con calderas comunitarias, estas son apagadas por la noche. Otra posibilidad sería que los propietarios apagaran la calefacción, indicando en el termostato una temperatura de consigna muy baja. Los resultados obtenidos muestran la demanda de calefacción global del edificio al aplicar estas medidas y su variación respecto de las demandas anteriormente estimadas con diferentes temperaturas de consigna.

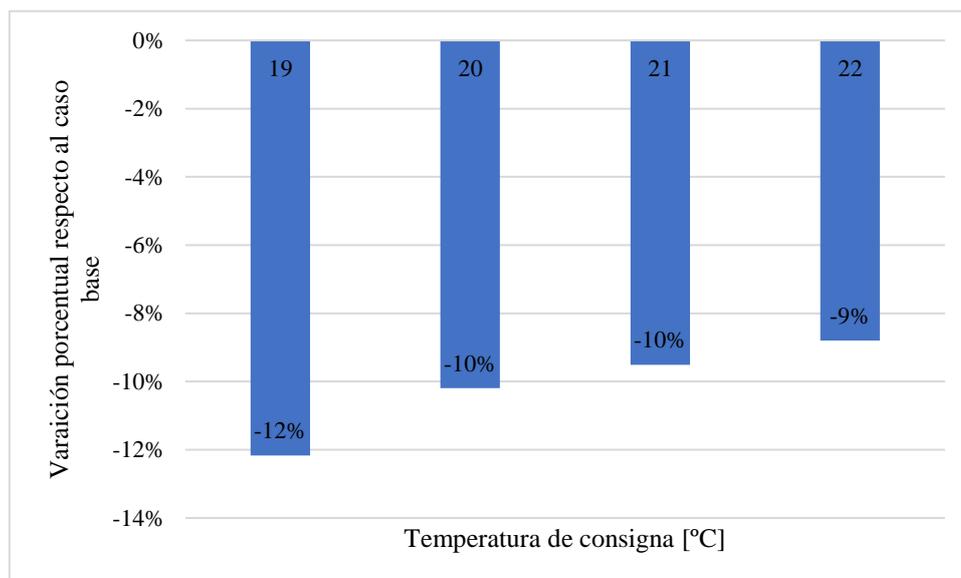


Gráfico 5. Dispersión de la demanda térmica de calefacción respecto a cada caso de temperatura de consigna antes el apagado nocturno de la calefacción

Se observa que la influencia del apagado de la calefacción durante las noches es sustancial y es una incertidumbre para tener en cuenta. Se observa que la reducción porcentual es similar para las diferentes temperaturas de consignas, dado que la temperatura de consigna nocturna de la estimación base es constante,  $17^{\circ}\text{C}$ .

En cuanto al apagado del aire acondicionado en el verano, su efecto es nulo porque gracias a la ventilación nocturna no se excede la temperatura de consigna de  $27^{\circ}\text{C}$ .

#### **Eficiencia de la iluminación y los aparatos eléctricos existentes**

Todo sistema eléctrico disipa parte de la energía eléctrica en forma de calor que se transmite al interior de las viviendas. A través de los dos siguientes análisis, se trata de dilucidar la influencia de los consumos eléctricos en las demandas térmicas de calefacción y refrigeración de las viviendas estudiadas.

En el caso de la iluminación y en base a lo indicado en la Tabla 23 y Tabla 24 del **ANEXO II**, relativas a la eficiencia de los diferentes tipos de bombilla y sus fracciones radiantes y convectivas, se estudia la influencia de los diferentes tipos de bombillas en las demandas térmicas del edificio. Para la comparativa, se toman como valores extremos el tipo de bombilla con menor eficiencia, la halógena, y el de mayor eficiencia actual, la LED. Los aportes térmicos se estiman en base a una iluminancia constante para todos los casos, 150 lm.

Por otro lado, para los aparatos eléctricos existentes y como se indica en el **ANEXO I**, los aparatos eléctricos se categorizan en referencia con su eficiencia energética según una escala de la “A” a la “G”, siendo los que poseen la “A” los más eficientes. Para la realización del estudio, se segmenta la escala en tres grupos: alta eficiencia (A, B y C), media eficiencia (D y E) y baja eficiencia (F y G). Dado que cada electrodoméstico o equipo tiene la escala energética reglamentada<sup>1</sup> con diferentes parámetros se va a considerar que la variación en potencia térmica emitida es del ±50% de la potencia de la estimación base.

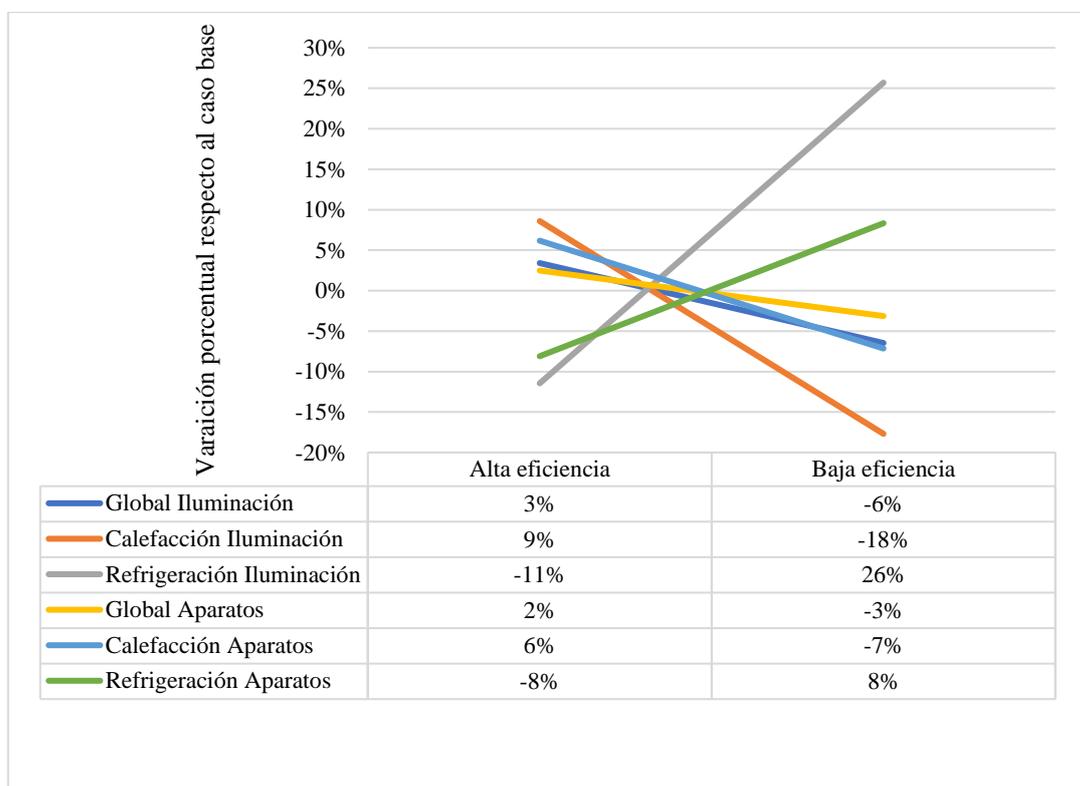


Gráfico 6. Variación de la demanda térmica de calefacción, refrigeración y global respecto de la demanda global base en cada uno de los casos de eficiencia de iluminación y de los aparatos eléctricos

Se observa que a mayor eficiencia en las bombillas la demanda térmica de calefacción aumenta, mientras que la de refrigeración se reduce. No obstante, en el cómputo global la influencia de la iluminación no es relevante siendo inferior al 7% de variación.

Por otro lado y de misma forma, se observa que los aparatos más eficientes favorecen una mayor demanda térmica de calefacción y una menor de refrigeración respecto a la estimación base. A semejanza de las bombillas, su influencia en el cómputo total de demandas térmicas es reducida al ser inferior al 3%.

Además, la eficiencia de la iluminación y de los aparatos eléctricos afecta especialmente a los consumos eléctricos de la vivienda puesto que la variación de los consumos puede exceder el 50% entre las estimaciones superior e inferior y la estimación base.

<sup>1</sup> Lavavajillas, lavadoras, lavasecadoras, frigoríficos, pantallas y monitores, lámparas, bombillas, sistemas de refrigeración y secadoras

## Ventilación

Las viviendas no disponen de ventilación mecánica de doble flujo con recuperación de calor. Para la renovación del aire del interior, se recurre a la ventilación natural mediante la apertura de las ventanas entre las 7:00-9:00 en invierno y entre las 21:00-9:00 en verano. Dado que no ha sido posible encontrar información relativa a los horarios recomendados para la realización de la ventilación de las viviendas, se han supuesto unos casos razonables y habituales. Se estima que, durante el tiempo de apertura de las ventanas, se realiza una renovación por hora. A través de una variación de un  $\pm 50\%$  de sobre el valor nominal, se estudia la influencia de esta variable en las demandas de calefacción y refrigeración.

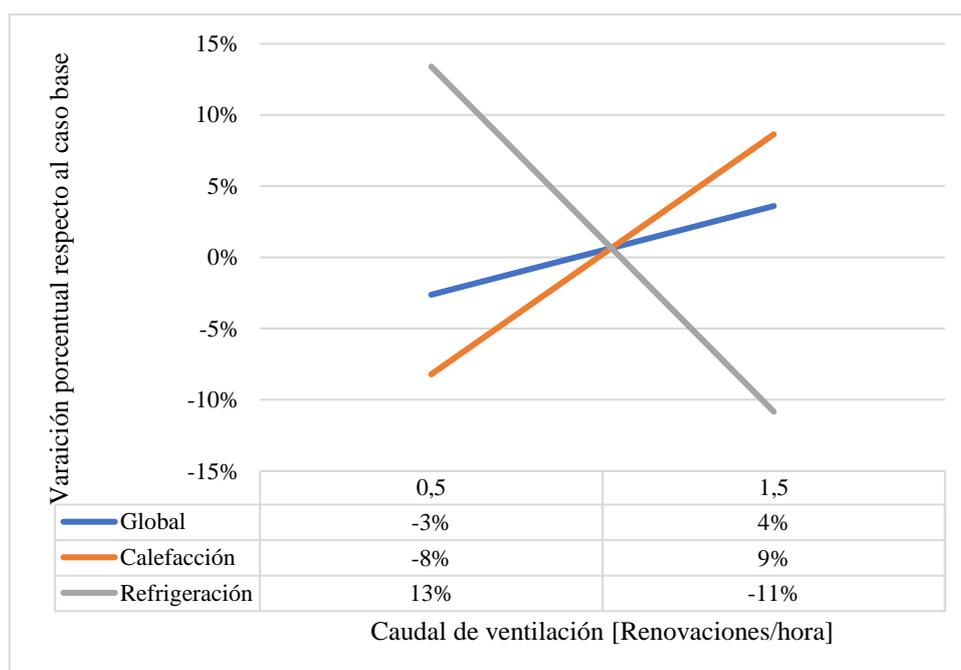


Gráfico 7. Dispersión de la demanda térmica de calefacción, refrigeración y global respecto al caso base por la variación del número de renovaciones por hora de aire

Se observa que la influencia del caudal de ventilación es bastante reducida en el cómputo final. Por consiguiente, sería interesante estudiar los perfiles de ventilación o la posibilidad de la instalación de ventilación mecánica.

## Otros

Otros estudios y factores menores son desarrollados en el **ANEXO V**. Los factores desarrollados son, por ejemplo, aspectos psicológicos y sociológicos, los ingresos medios de la vivienda, el nivel educativo, el sexo o el transporte eléctrico. Este último tiene una gran influencia dado que un coche eléctrico consume, según el IDAE, aproximadamente 1630 kWh anuales, lo que supone un aumento sustancial sobre la electricidad consumida anualmente.

## Cerramientos y huecos

### Transmitancia térmica de las ventanas y lucernarios

Como se indica en el **ANEXO II**, el valor de la transmitancia térmica de un marco metálico con RPT puede oscilar entre los 4,00 y los 2,50 W/m<sup>2</sup>·K, mientras que en el caso del vidrio aislante este valor oscila entre los 3,30 y los 2,70 W/m<sup>2</sup>·K.

Con el fin de conocer la influencia de las propiedades térmicas de los huecos, se estudia la influencia de los casos límite superior,  $3,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , e inferior,  $2,60 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , de los anteriores valores citados. Además, se va a estudiar la posibilidad de que el marco metálico no posea la capacidad de rotura de puente térmico,  $3,80 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .

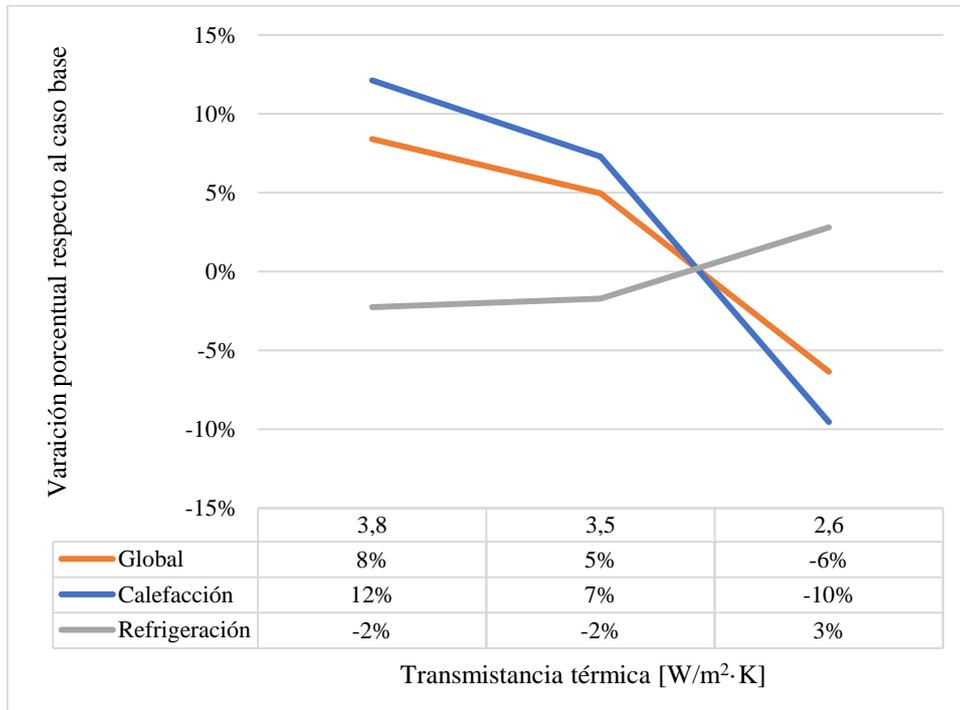


Gráfico 8. Dispersión de la demanda térmica de calefacción, refrigeración y global respecto del caso base por la variación de la transmitancia térmica de las ventanas

Se observa una influencia moderada. No obstante, la medición de estos valores resulta compleja y, por consiguiente, es una incertidumbre para tener en cuenta.

### Factor solar de los vidrios de las ventanas y lucernarios

De forma pareja, se estudia la influencia del factor solar de todos vidrios del edificio en las demandas térmicas de calefacción y refrigeración en la vivienda con un caso con un valor alto, 0,99, y con un caso con un valor bajo, 0,5.

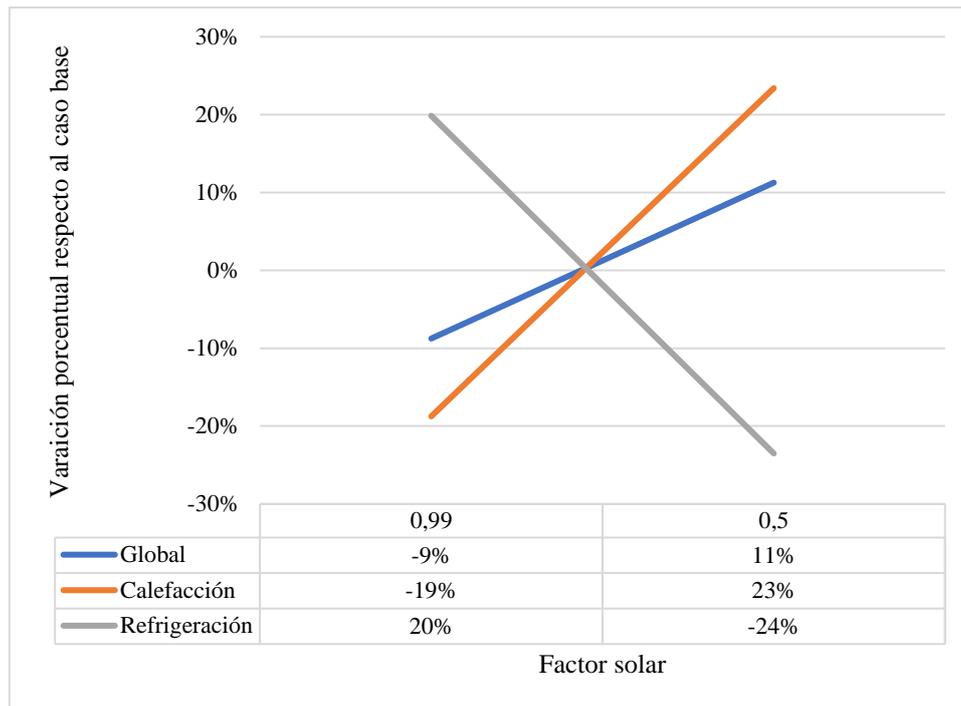


Gráfico 9. Dispersión de la demanda térmica de calefacción, refrigeración y global respecto del caso base por la variación del factor solar de las ventanas

Se observa que el factor solar, traducido al porcentaje de energía que atraviesa el vidrio de la ventana, es un valor para tener en cuenta. Se constata que un mayor factor solar, como es lógico, reduce la demanda de calefacción, pero aumenta la de refrigeración. No obstante, el uso de persianas o cortinas puede reducir las ganancias térmicas durante los meses estivales. Por otro lado, los edificios colindantes pueden actuar sombreando y evitando la radiación directa de la luz sobre las ventanas y lucernarios. Además, por la orientación de la vivienda, hacia el sur, la influencia de este parámetro es más grande en las ventanas orientadas hacia este punto cardinal.

## Clima

Los datos climáticos empleados por CYPETHERM HE Plus son obtenidos de los ficheros de datos climáticos realizados por parte de **Rafael Villar Burke** y **Daniel Jiménez González** del **Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)** en 2015 [11] en base a valores predefinidos como la zonificación climática, y la zona de invierno y verano.

No obstante, los datos son estáticos y pueden presentar variaciones de un año a otro debido a comportamientos climáticos cíclicos o no, eventos medioambientales o la acción del hombre en el actual transcurso del calentamiento climático.

En este último concepto se profundiza buscando archivos climáticos adicionales con los que comparar los utilizados. CYPETHERM HE Plus únicamente reconoce archivos “EPW” que son los archivos utilizados en EnergyPlus, dado que el motor de simulación utilizado es el de este programa. Se halla la página web **Climate.OneBuilding** [38] que contiene datos meteorológicos de más de 16.000 localizaciones, cuatro de ellas de Zaragoza. Destacan entre estas, las que recogen la media de datos climáticos de los períodos de 1958-2021, 2004-2018 y 2007-2021 cuyos datos son descargados e insertados en el programa con el fin de observar la divergencia entre los diferentes ficheros con el fichero incluido en CYPETHERM HE Plus.

Caso	Calefacción [kWh/m <sup>2</sup> ·año]	Refrigeración [kWh/m <sup>2</sup> ·año]	Variación calefacción [%]	Variación refrigeración [%]	Variación global [%]
<b>1958-2021</b>	24,46	10,98	-33,53	-14,49	-28,61
<b>2004-2018</b>	24,23	13,88	-34,16	+8,10	-23,23
<b>2007-2021</b>	20,67	13,74	-43,83	+7,01	-30,68

Tabla 9. Demandas de calefacción y refrigeración y su variación sobre el caso base estimado con los dos ficheros de datos meteorológicos descargados

Se observa que las demandas de calefacción y refrigeración con la serie más contemporánea difiere sustancialmente, con gran dispersión en el caso de la demanda térmica de calefacción, de las estimadas con los datos climáticos descritos anteriormente. Por consiguiente, se constata que la divergencia entre los datos climáticos existentes y los recogidos de una estación meteorológica es relevante. Destaca en esta dirección el estudio de **Bhandari et al. (2012)** [39], donde se compararon los datos meteorológicos suministrados por terceros y los datos meteorológicos obtenidos de una estación meteorológica. Los resultados indicaban la dispersión del consumo energético anual puede alcanzar el  $\pm 7\%$ , mientras que la dispersión en las demandas térmicas mensuales puede alcanzar el  $\pm 40\%$  según los datos climáticos empleados.

Además, se observa una disminución de la demanda de calefacción, mientras que la demanda de refrigeración aumenta según las series se acercan más al presente. Por consiguiente, los resultados coinciden con estudios similares como en el de **Cuadrat et al. (2014)** [40] quien indica que el efecto del calentamiento global en la disminución de las demandas térmicas de calefacción y el aumento de las demandas térmicas de refrigeración en las últimas décadas. Por consiguiente, este fenómeno quizás no se esté siendo incluido en los programas de simulación o en el propio **Código Técnico de la Edificación**.

## Equipos y sus características

### Efecto del clima en la bomba de calor y sistemas de refrigeración

En base a lo anteriormente comentado, las bombas de calor instaladas tendrían una potencia nominal de 30,10 kW y un COP nominal de 3,91. Dado que la potencia nominal no satisface la dimensionada, 60 kW, se introduce en el modelo numérico una bomba de calor para cada dos pisos, es decir, para cada cuatro viviendas. Por otro lado, el ACS se producirá con estas mismas bombas. La alimentación eléctrica de la bomba de calor es trifásica.

CYPETHERM HE Plus permite, con los datos climatológicos introducidos, obtener los rendimientos medios estacionales de las bombas de calor y los sistemas de refrigeración. De esta forma, los resultados obtenidos de la simulación indican que el consumo de electricidad por parte de las bombas de calor es de 11.880 kWh anuales para la calefacción y un rendimiento medio estacional (SPF o SCOP) de 2,66. En cuanto al consumo de electricidad anual para ACS es de 6.690 kWh. El consumo energético se reduce en un 67% la energía final y un 40% la energía primaria utilizada.

Por otro lado, los sistemas de refrigeración poseen un SEER de 2,65-2,7, no alejado de su EER nominal de 2,70. Esta menor divergencia, respecto a las bombas de calor, es debido a la menor diferencia de temperaturas entre los dos focos de trabajo.

Se recuperan los datos climáticos de la serie 2007-2021 anteriormente empleados en las simulaciones para el estudio de la influencia del calentamiento climático en los rendimientos medios estacionales de los sistemas de climatización.

<b>Datos</b>	<b>Rendimiento medio estacional (SPF)</b>	<b>Variación [%]</b>
<b>Bomba de calor</b>	2,78	+4,35
<b>Sistemas de refrigeración</b>	2,60	-3,84

Tabla 10. Rendimiento medio estacional y variación de este con los datos climáticos de la serie 2007-2021

Es remarcable el aumento del rendimiento medio estacional de la bomba de calor y la disminución de este en el caso de los sistemas de refrigeración. Nuevamente, se presentan como muy relevantes los datos climáticos introducidos, dado que el rendimiento medio estacional de ambos sistemas depende de ellos y, por ende, la incertidumbre de estos datos afecta doblemente, a las demandas y a los consumos finales.

### **Instalación fotovoltaica**

Para la estimación de la producción eléctrica fotovoltaica se utilizó el programa **Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)** desarrollado por el **Centro Común de Investigación** de la Comisión Europea. Para la obtención de la radiación solar incidente, utiliza datos de los satélites METEOSAT que permiten obtener datos de África, Europa y casi toda Asia. No obstante, es necesario obtener el valor de la radiación solar a nivel de suelo. Para ello, se utilizan algoritmos matemáticos que, además de utilizar la información ofrecida por los satélites, emplea otros datos como el nivel de vapor de agua, aerosoles (polvo, partículas) y ozono en la atmósfera. En estos cálculos, ciertas condiciones, como confundir la nieve con nubes o la dificultad para detectar tormentas de arena, pueden reducir su precisión. Para la validación de los algoritmos, los valores obtenidos en los satélites se cotejan con mediciones a nivel de suelo obtenidas en estaciones meteorológicas.

La producción obtenida, despreciando las pérdidas de los sistemas, es de 22.999,31 kWh. En el caso de incluir las pérdidas de los sistemas (un 14% es lo sugerido por defecto por el programa), la producción se reduce a 19.779,41 kWh. Precisamente es este concepto donde el programa posee su mayor limitación, sin un conocimiento ajustado de los sistemas que se van a instalar no es posible estimar correctamente sus pérdidas asociadas y, por consiguiente, la producción eléctrica resultante. Por consiguiente, es interesante estimar la influencia de las pérdidas en los sistemas con el fin de estimar la incertidumbre asociada a la generación eléctrica.

En **Saeed et al. (2021)** [41], se agrupan las pérdidas de las instalaciones en tres: pérdidas en el propio módulo fotovoltaico, pérdidas por conexión entre paneles y pérdidas por los sistemas. En el **ANEXO IV** se detallan de forma pormenorizada todas las incertidumbres y pérdidas en una instalación fotovoltaica, pero en la siguiente tabla se ofrece un resumen con las incertidumbres/pérdidas más destacables.

<b>Incertidumbre</b>	<b>Influencia</b>
Potencia del módulo fotovoltaico	$\pm 5W$ ( $\pm 1,08\%$ )
Ensuciamiento	-4,4% a -6% (máx. -15%)
Inclinación paneles (12°)	-3,06% <sup>1</sup>
Efectos espectrales	+0,65% <sup>1</sup>
Temperatura	-10,09% <sup>1</sup>
Caídas óhmicas	Máx. -5%
Inversor	-2,5% de la potencia generada
<b>Incertidumbre total de los equipos</b>	<b>-5,82% a -14,58%</b>

Tabla 11. Pérdidas en la producción eléctrica de la instalación fotovoltaica sugerida

Se observa que existe una gran divergencia entre la energía producida y la energía nominal. Por lo tanto, es muy importante conocer su efecto con el fin de dimensionar la instalación de la mejor forma y reducir los efectos de algunas de ellas, como por ejemplo el ensuciamiento con limpiezas anuales.

## Precio de la energía

El precio de venta de la electricidad y del gas natural están influenciados y afectados tanto por el desarrollo y variabilidad del mercado como por la propia legislación nacional y comunitaria, quién regula el mercado y grava los productos.

### Electricidad

En la actualidad, el precio de la electricidad es indicado por el **Operador del Mercado Ibérico de Energía (OMIE)** quien casa la demanda con la oferta a un precio de mercado o “precio marginal” marcado por la última central eléctrica en lanzar su oferta en el proceso de subasta. Por consiguiente, las energías más baratas; renovables, carbón y nuclear; son las primeras en entrar y las más caras; gas y tecnologías mixtas; las últimas, marcando el precio final de la electricidad.

Además, la electricidad está sujeta a diversos impuestos con un valor actual de 5% por la crisis energética, mientras que antes de esta alcanzaba el 33% de gravamen.

A continuación, se puede observar el precio de la electricidad a lo largo de los últimos 16 meses.

<sup>1</sup> Valores obtenidos de la simulación en PVGIS y que se consideraran sin incertidumbre asociada. Sus aportaciones a la incertidumbre total son despreciadas al considerarse datos conocidos por el emplazamiento.

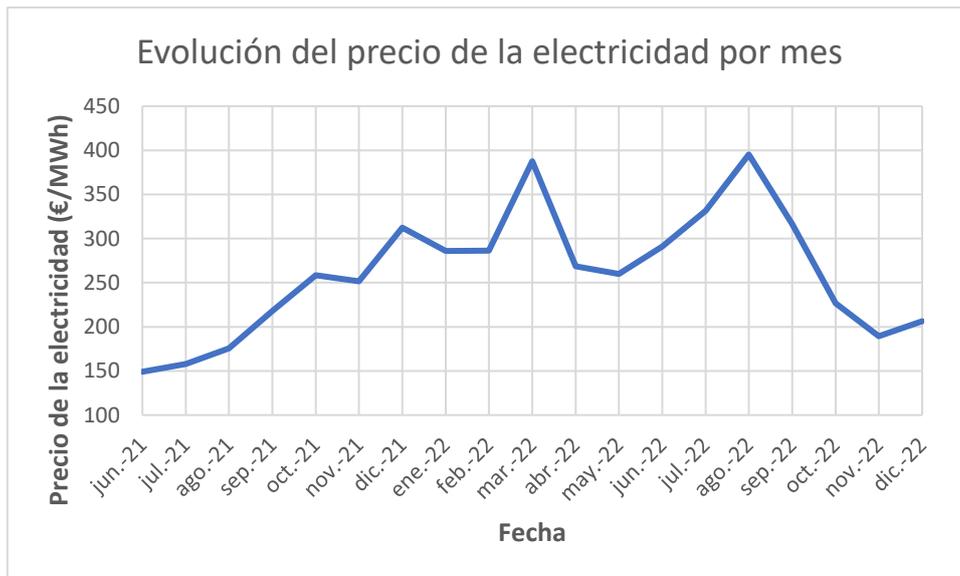


Ilustración 6. Evolución del precio de la electricidad en los últimos 16 meses [Elaboración propia con los datos del Sistema de Información del Operador del Sistema (e-sios) de la Red Eléctrica de España]

## Gas natural

España no es un gran productor de gas natural, lo que obliga a importarlo del exterior. Del total importado, el 58% del gas entra por gasoducto y el 42% restante mediante buques “metaneros” en forma de gas natural licuado (GNL)[42].

Por esta razón, España es el país de la Unión Europea con mayor número de plantas regasificadoras, seis, y posee una capacidad de almacenamiento de gas natural licuado y regasificación del 38% y del 32% del total comunitario respectivamente. [43]

En cuanto al precio en el mercado mayorista, el **Banco de España** en su último **Boletín Económico** de marzo de 2022 [44] incluye esta gráfica de la evolución del precio del gas natural en el mercado europeo y estadounidense y queda patente la diferencia entre productores y consumidores.

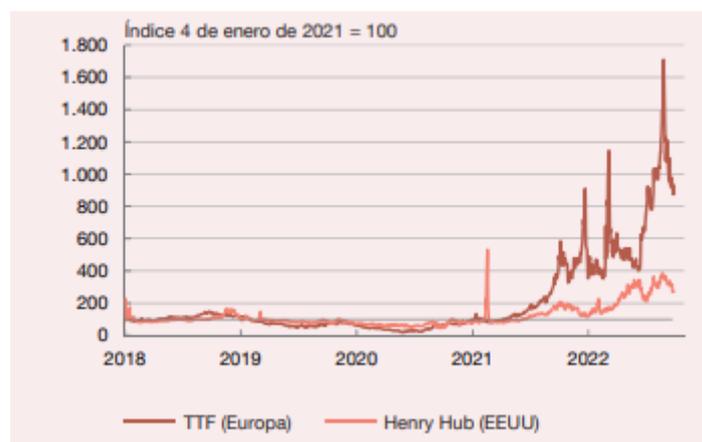


Ilustración 7. Evolución del precio del gas natural respecto al índice del 4 de enero de 2021 [44]

En línea con esto, el **Gobierno de España** aprobó el “tope al gas” o mecanismo de ajuste de costes de producción para la reducción del precio de la electricidad en el mercado mayorista por el **Real Decreto Ley 10/2022** por el que se fijaba un precio máximo de 40 €/MWh desde junio a

diciembre de 2022 y aumentando su precio máximo en 5 €/MWh por mes hasta alcanzar los 70 €/MWh en junio de 2023, momento en el que dejará de ser aplicable.

Además, se aprobó el **Real Decreto Ley 18/2022** por el que se creó la *Tarifa de Último Recurso* (TUR) de Ahorro Vecinal regulada por el Gobierno de España y destinada a las comunidades de vecinos con calderas comunitarias de gas natural. La tarifa limita los precios del mercado y está subvencionada por el Gobierno. Se estima que puede reducir la factura en un 50%. [45]

Por consiguiente, se observa que la influencia de ambos valores, electricidad y gas natural, presentan la propia variabilidad de la relación de la demanda/oferta y, además, el efecto de otras variables como los impuestos gravados o la influencia de acontecimientos geopolíticos.

## **Conclusiones preliminares**

De forma general, se ha observado que la gran mayoría de las variables estudiadas afectan de forma antagonista a las demandas de calefacción y refrigeración, es decir, cuando una de ellas se ve incrementada por la influencia de la variable estudiada, la otra se ve disminuida. Por consiguiente, sus efectos se contrarrestan en el cómputo total de demandas del edificio.

Las variables de mayor influencia e incertidumbre asociada en los resultados han sido el factor y comportamiento humano y el clima. En el primer caso, la variabilidad e individualidad de cada ocupante dificulta fijar valores como la temperatura de consigna, la elección de la iluminación o los aparatos eléctricos de la vivienda, o la ventilación de la misma. Por otro lado, los datos climáticos incluidos en el programa CYPETHERM HE Plus, poseen una gran desviación respecto de los datos experimentales obtenidos a lo largo de los últimos 60 años en observatorios meteorológicos de Zaragoza, siendo la dispersión de un 44% para la demanda de calefacción y un 7% para la demanda de refrigeración. Además, su influencia es doble ya que afecta tanto al cálculo de las demandas térmicas de calefacción y de refrigeración como al rendimiento medio estacional de los equipos de climatización.

En el otro extremo, las variables que han resultado de menor influencia han sido las propiedades térmicas de las ventanas y el número de ocupantes permanentes. La primera de ellas se debe a la reducida área que suponen las ventanas respecto de la envolvente global del edificio, y en el caso de la segunda se debe a la reducida variación del número de ocupantes permanentes, 1-6 personas, y su constante permanencia de lunes a domingo en las viviendas.

Cabe destacar de las variables como la eficiencia de la iluminación y los aparatos eléctricos, su influencia en el consumo eléctrico, independientemente de su baja influencia en la incertidumbre de las demandas térmicas globales del edificio.

En cuanto a la instalación fotovoltaica, se observa la enorme cantidad de factores con incertidumbre asociada que alteran la producción fotovoltaica final. El clima y la ubicación de la instalación fotovoltaica determinan la producción debido a las pérdidas por temperatura y efectos angulares. No obstante, otros factores como el ensuciamiento de los módulos o la eficiencia y desempeño de los sistemas también introducen incertidumbre en la producción fotovoltaica final.

## CAPITULO III. ESTUDIO ECONÓMICO

Ante la realización de dos inversiones, cambio de las calderas de gas natural por bombas de calor y la instalación de módulos fotovoltaicos en el tejado, es necesario realizar un estudio económico con el fin de conocer la cuantía económica y el tiempo de retorno o plazo de amortización de las inversiones. No obstante, al encontrarse el estudio sustentado sobre un análisis de incertidumbre, esta se propagará hasta el resultado final, el tiempo de retorno de la inversión.

A lo largo del presente capítulo, se va a indicar los valores económicos que participan en el estudio, los diferentes escenarios a estudiar y los resultados obtenidos ante ellos. No obstante, si se desea profundizar en el origen o la justificación de algunos de los valores o comprender con mayor detalle los datos del estudio económico se puede consultar el **ANEXO VI**.

A continuación, se detallan los desembolsos económicos, impuestos asociados, ayudas e incentivos y las bonificaciones a los impuestos.

Concepto	Cuantía [€]
Inversión instalación fotovoltaica	21.000,00
Inversión bomba de calor	64.745,00
Impuesto sobre Construcciones, Instalaciones y Obras (ICIO)	3.461,80
Ayuda bomba de calor	-24.000,00
Ayuda instalación fotovoltaica	-7.383,00
Bonificación ICIO	-3.288,71
<b>Inversión tras ayudas</b>	<b>55.335,09</b>

Tabla 12. Inversiones, impuestos, ayudas y bonificaciones de los sistemas a instalar

De las variables estudiadas, se descartan las que influyen de forma reducida tanto a las demandas de calefacción como de refrigeración. Estas son: la ventilación, el número de ocupantes permanentes y los huecos. Por otro lado, la influencia de la desocupación permanente o parcial de las viviendas se descarta del estudio económico por su bajo efecto en Zaragoza, ciudad de primera residencia.

Se realizan, junto al caso base, un caso favorable y un caso desfavorable a la amortización de las inversiones. En estos tres casos, las variables y su influencia en el modelo numérico son:

Variable	Caso base	Caso desfavorable	Caso favorable
Temperatura de consigna	/	Calefacción: -17% Refrigeración: -24%	Calefacción: +38% Refrigeración: +84% <sup>1</sup>
Caldera apagada noche	/	Calefacción: -12%	/
Clima	/	Calefacción: -44% Refrigeración: +7% Afecta a los SPF	/
Fotovoltaica	Pérdidas: 7%	Pérdidas: 0%	Pérdidas: 14%
Aparatos eléctricos	/	Electricidad de los aparatos: -50%	Electricidad de los aparatos: +50%
Iluminación	/	Electricidad de la iluminación: -50%	Electricidad de la iluminación: +116%

Tabla 13. Variables y su influencia en los tres casos de estudio

<sup>1</sup> Se toma el valor para 22°C de temperatura de consigna de límite inferior, dado que, como se indica, la temperatura de consigna indicada no tiene por qué ser la temperatura objetivo.

Por otro lado, también participan del estudio los precios del gas, de la luz y de los excedentes a vender que se considerarán un 20% de la producción anual. A continuación, se detallan los precios para cada uno de los casos obtenidos de la comparadora online **Selectra** [46]–[48].

<b>Variable</b>	<b>Caso base</b>	<b>Caso desfavorable</b>	<b>Caso favorable</b>
<b>Gas (€/kWh)</b>	0,1408	0,0607	0,1655
<b>Coste fijo del gas (€/mes)</b>	11,23	9,52	11,18
<b>Electricidad (€/kWh)</b>	0,2178	0,1504	0,311
<b>Excedentes (€/kWh)</b>	0,117	0,138	0,08

*Tabla 14. Costes económicos para los tres casos de estudios*

El estudio se compone de seis casos. Tres de ellos previos a la rehabilitación y los otros tres restantes posteriores a la rehabilitación. De esta forma, se comparan los resultados económicos de los casos con mismas condiciones, es decir, caso base con caso base e igual con el resto.

Como asunciones, se considera que la pérdida de potencia anual de los paneles, aproximadamente un 1%, no se tomará en cuenta dada su baja influencia.

De esta manera, se obtiene los siguientes resultados para cada una de las situaciones.

<b>Caso</b>	<b>Consumo gas [kWh/año]</b>	<b>Consumo electricidad [kWh/año]</b>	<b>Coste [€/año]</b>
Caso desfavorable	36.308	21.537	5.557
Caso base	55.978	36.732	16.017
Caso favorable	68.874	68.042	32.694

*Tabla 15. Consumos y coste anuales del edificio previos a la rehabilitación bajo las condiciones de los tres casos*

<b>Caso</b>	<b>Consumo electricidad [kWh/año]</b>	<b>Producción electricidad [kWh/año]</b>	<b>Excedentes electricidad [kWh/año]</b>	<b>Compra electricidad [kWh/año]</b>	<b>Coste [€/año]</b>
Caso desfavorable	32.774	23.000	4.600	14.374	1.527
Caso base	55.302	21.390	4.278	38.190	7.817
Caso favorable	90.800	19.780	3.956	74.976	23.001

*Tabla 16. Consumos, producción y coste anuales del edificio posteriores a la rehabilitación bajo las condiciones de los tres casos*

Se observa que, en cualquiera de los casos, el coste anual con los nuevos sistemas reduce el coste anual de los consumos. Los resultados de tiempo de retorno de la inversión resultan en cada uno de los escenarios y teniendo en cuenta si las ayudas llegan o no a otorgarse.

<b>Caso</b>	<b>Tiempo con subvenciones [años]</b>	<b>Tiempo sin subvenciones [años]</b>
Caso favorable	5,44	8,52
Caso base	6,43	10,07
Caso desfavorable	13,08	20,49

*Tabla 17. Tiempo de retorno de la inversión para cada uno de los casos con y sin subvenciones*

Se observa una amortización de las inversiones inferior a la vida útil media de estas instalaciones, 25 años. Incluso en el caso más pesimista, 20,5 años al considerar que las ayudas no son otorgadas, el tiempo de retorno sería inferior a la vida útil de las instalaciones. Además, el estudio está realizado con un IVA reducido al 5% tanto en el gas natural como en la electricidad frente al 21% existente previo a la crisis energética y que, por consiguiente, reduciría el tiempo de amortización

en, aproximadamente, un 15% del tiempo estimado. Si, además, se volvieran a aplicar impuestos temporalmente suspendidos, como el Impuesto sobre el valor de la producción de energía eléctrica (7%) o el impuesto a la electricidad (5,11%), el tiempo de amortización se reduciría en un 21%.

Por otro lado, es de interés destacar que el intervalo de dispersión del tiempo de amortización es desde 5,5 años a 20,5 años, siendo el valor medio 8,25 años, lo que supone una gran desviación, más de 2 veces del valor medio en el caso pesimista, y es un dato necesario y previo a la aceptación de las actuaciones sugeridas, puesto que la incertidumbre puede suponer una sorpresa por no cumplirse el valor del caso base estimado.

## CONCLUSIONES

A lo largo del presente Trabajo de Fin de Máster, se ha estudiado la influencia de la incertidumbre de los datos de entrada en los resultados obtenidos del modelo numérico de un edificio compuesto por ocho viviendas con el fin de conocer el riesgo de los inversores ante un rehabilitación energética. Se ha constatado la diferente influencia de cada una de las variables estudiadas. A continuación, se muestra con una tabla resumen el efecto de las variables estudiadas en las demandas térmicas de calefacción, refrigeración y global del edificio siendo, respectivamente, 36,80 kWh/m<sup>2</sup>·año, 12,84 kWh/m<sup>2</sup>·año y 49,64 kWh/m<sup>2</sup>·año.

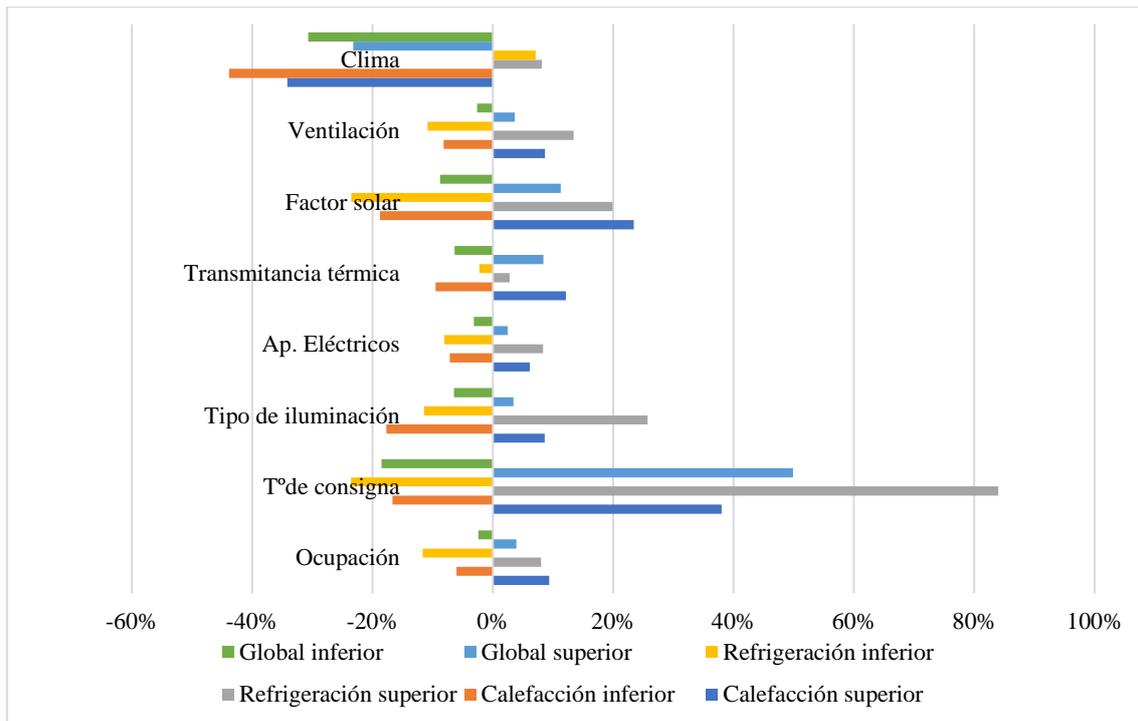


Gráfico 10. Límites superior e inferior de las estimaciones realizadas sobre las demandas térmicas de calefacción, refrigeración y global

Destacan enormemente la temperatura de consigna; el factor humano, difícil de modelizar y que puede ser variable; y el clima, que no se encuentra bien modelizado en CYPETHERM HE Plus y además afecta doblemente tanto a las demandas térmicas como a los consumos al modificar los rendimientos medios estacionales de los sistemas como bombas de calor y sistemas de refrigeración.

En cuanto al estudio económico realizado, la dispersión es sustancial en el tiempo de retorno de las inversiones, siendo su valor medio 8,25 años y sus límites superior e inferior, respectivamente, 144% y -32%. No obstante, aun en el caso más pesimista, 20,5 años, las inversiones se recuperarían en un período inferior a la vida útil de las actuaciones, 25 años.

Por consiguiente y tras haber realizado un análisis de incertidumbre con el fin de concluir la viabilidad económica y la dispersión en el tiempo de retorno de inversión, se puede constatar que existe una gran dispersión tanto en las demandas, consumos y tiempos de amortización, lo que conlleva ser cauto y crítico con los resultados obtenidos en una simulación.

## LÍNEAS FUTURAS

Tras un estudio numérico, es necesario cotejarlos con la realidad. Se podría recopilar datos medidos, demandas y consumos, en instalaciones reales y contrastarlos con los obtenidos en las simulaciones. De esta forma, se podría estudiar la dispersión existente de forma experimental y si existe cierta semejanza con los valores obtenidos en las simulaciones. En la misma línea, la recopilación de datos reales de amortización de instalaciones similares a las sugeridas y contrastarlos permitiría conocer si existe semejanza con la realidad.

Como se ha constatado, la influencia de los datos meteorológicos es muy alta en las demandas térmicas, los rendimientos de los equipos de climatización y en la producción fotovoltaica. Sería de gran interés profundizar en la variabilidad climatológica, su evolución, la influencia de las masas acuáticas o plantear modelos predictivos para análisis en años futuros. Además, también se podrían plantear diferentes escenarios climatológicos y contemplar su influencia en las tasas de retorno de los proyectos.

Otra variable de gran influencia es el factor humano, por esta razón los perfiles horarios y/o mensuales de cada vivienda de uso de la iluminación o de los aparatos eléctricos, la ocupación o la temperatura de consigna serán diferentes. Por consiguiente, un estudio demoscópico y estadístico para conocer estos perfiles y disponer de datos más precisos permitiría obtener resultados más cercanos a la realidad.

Finalmente, la mejora de los programas de simulación disminuiría la incertidumbre asociada a estos. Algunas de las sugerencias serían aumentar las funcionalidades de los programas, incluyendo mayor número de sistemas y equipos de climatización; almacenamiento de energía; ampliando los materiales elegibles, como materiales de cambio de fase (Phase Change Material (PCM)); o disminuyendo el tiempo de cálculo.



## ANEXO I. LEGISLACIÓN

A lo largo del presente anexo, se profundiza en la legislación europea y en los efectos y su transposición en la legislación propia nacional.

### Normativa europea

Son fruto de la propuesta de la Comisión Europea y la, posterior, aprobación por el Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea en el caso de directivas, reglamentos y decisiones de naturaleza legislativa.

Se ha decidido por la ingente legislación concatenada aprobada durante los últimos 13 años, presentarla en bloques temáticos para comprender y seguir de forma cronológica los avances legislativos.

### Fomento de la energía procedente de fuentes renovables y transición energética

#### – Directiva 2009/28/CE (RED I)

Fijó un objetivo para el año 2020 de lograr que un 20% de la energía consumida en la Unión Europea proviniera de fuentes renovables.

Reconoció como energía renovable la energía capturada por las bombas de calor siempre que su SPF (factor de rendimiento medio estacional) sea superior a 2,5. A través de la **Decisión de la Comisión del 1 de marzo de 2013** (2013/114/UE), se indica como realizar los cálculos para esta consideración, siendo estos realizados de acuerdo con la norma UNE EN 14825:2016.

#### – Directiva 2018/2001/UE (RED II)

Fijó un objetivo para el año 2030 de lograr que, como mínimo, un 32% de la energía consumida en la Unión Europea proviniera de fuentes renovables. Por otro lado, en el sector de la climatización, estipuló un incremento anual de 1,3% en la cuota de energía renovables del sector.

#### – Reglamento Delegado 2022/759/UE

Modificó el Anexo VII de la Directiva 2018/2001/UE que incluía una metodología para el cálculo de la cantidad de energías renovables utilizada para la calefacción e incluyó otra metodología para calcular la cantidad de energías renovables utilizada para la refrigeración y los sistemas urbanos de refrigeración. Similar a la Decisión 2013/114/UE, indica que los cálculos deben ser realizados según las directrices de la norma UNE EN14511.

#### – “Objetivo 55” (RED III)

Legislación futura y que, actualmente, se está debatiendo en el Parlamento Europeo y en la Comisión Europea. Es un compendio de futuras Directivas llamado así por el objetivo de reducir un 55% las emisiones de ahora a 2030 y alcanzar la neutralidad climática en 2050. Algunos de los nuevos objetivos son aumentar hasta un mínimo del 40% de la energía consumida en la Unión Europea provenga de fuentes renovables para 2030; la inclusión de un sistema de intercambio de emisiones (ETS) en el sector doméstico y el transporte, además del ya existente en el industrial y energético; o aumentar la eficiencia energética a escala de la UE del 32,5% al 36%. [49]

### Eficiencia energética

Si bien es cierto que las anteriormente citadas directivas incluyen apartados relativos a la eficiencia energética, las siguientes son exclusivamente relativas a esta temática.

– **Directiva 2010/31/UE**

Definió el marco común general de la metodología de cálculo de la eficiencia energética integrada de los edificios, los requisitos mínimos de eficiencia energética de los nuevos edificios, la aplicación de requisitos mínimos en la eficiencia energética de edificios ya existentes, la creación de planes nacionales destinados a aumentar el número de edificios de consumo de energía casi nulo, la certificación energética de los edificios, la inspección periódica de las instalaciones de calefacción y climatización de los edificios, y los sistemas de control de los certificados de eficiencia energética y de los informes de inspección.

– **Directiva 2012/27/UE**

Definió un marco común de medidas para el fomento de la eficiencia energética con el fin de asegurar la consecución del objetivo de un 20 % de ahorro energético para 2020.

– **Directiva 2018/844/UE**

Se dirigió a la renovación rentable de los edificios existentes, introduce sistemas de control y automatización de edificios como alternativa a las inspecciones físicas, fomenta el despliegue de la infraestructura necesaria para movilidad eléctrica, e introduce un indicador de inteligencia para evaluar la preparación tecnológica del edificio.

– **Directiva 2018/2002/UE**

Similar a la Directiva 2012/27/UE, definió un marco común de medidas para el fomento de la eficiencia energética con el fin de asegurar la consecución del objetivo de un 32,5 % de ahorro para 2030.

### **Indicación y etiquetado según el consumo energético**

– **Directiva 2010/30/UE**

Relativa a la indicación del consumo de energía y otros recursos por parte de los productos relacionados con la energía, mediante el etiquetado y una información normalizada.

– **Reglamento 2017/1369/UE**

Derogó la Directiva 2010/30/UE y cambió el texto jurídico para evitar divergencias entre los estados miembros. Dada la continua mejora de la eficiencia de los aparatos mejora continuamente, se generaba un amontonamiento de estos en la clase A, produciéndose A<sup>+</sup>, A<sup>++</sup> y A<sup>+++</sup>. Esta nueva legislación, retoma las 7 clases, de la A a la G, insta a la reescalación de las clases y prevé la reserva de la clase A, en vista de la mejora de la eficiencia en 10 años, con el fin de evitar que la escala se quede corta otra vez.

### **Otras**

– **Directiva 2009/125/CE**

Instauró un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía (ErP). Esta normativa es aplicable a los productos que transfieren, generan o miden la energía, así como determinados productos relacionados con ella.

### **Normativa española**

Aunque la responsabilidad de su aprobación es de los órganos legislativos de España, el Congreso de los Diputados y el Senado, ha sido el poder ejecutivo, el Consejo de Ministros, quién a base de reales decretos leyes y órdenes ministeriales ha legislado, o transpuesto, las directivas emanadas por los anteriormente citados órganos europeos.

Principalmente, la legislación se ha centrado en dos documentos que detallan a continuación.

### **Código Técnico de la Edificación-CTE**

Aprobado mediante el **Real Decreto 314/2006**, ha sufrido numerosas enmiendas dadas las directivas anteriormente citadas. Caben destacar las enmiendas que ha sufrido el Documento Básico DB-HE “Ahorro de energía”:

- Transposición de la Directiva 2010/31/UE:
  - **Orden FOM/1635/2013**: actualización del DB-HE, definición de “edificio de energía casi nulo”, nivel de eficiencia energética atribuible a estos y mínimo de energía cubierta por fuentes renovables.
  - **Orden FOM/588/2017**: desarrollo del procedimiento para la certificación energética de edificios.
  - **Real Decreto 732/2019**: revisión de la eficiencia energética atribuible a los edificios y actualización de la definición de “edificio de energía casi nulo”.
- Transposición de la Directiva 2018/844/UE:
  - **Real Decreto 450/2022**: desarrollo de la infraestructura para la recarga de vehículos eléctricos.

### **Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios-RITE**

Aprobado mediante el **Real Decreto 1027/2007**, ha sufrido como el CTE numerosos enmiendas dadas las directivas anteriormente citadas. Caben destacar las enmiendas realizadas más importantes:

- Transposición de la Directiva 2010/31/UE:
  - **Real Decreto 238/2013**: regulación de las inspecciones a instalaciones térmicas y adaptación a requerimientos de ahorro y eficiencia energética.
- Transposición de la Directiva 2012/27/UE:
  - **Real Decreto 56/2016**: marco normativo relativo a las auditorías energéticas, sistemas de acreditación proveedores de servicios y auditores energéticos, y promoción de la eficiencia energética.
- Transposición de la Directiva 2012/27/UE y la Directiva 2018/2022/UE:
  - **Real Decreto 736/2020**: obligación de instalación de contadores individuales que midan el consumo de energía térmica de cada consumidor.
- Transposición de la Directiva 2018/2022/UE:
  - **Real Decreto 178/2021**: disposiciones adicionales sobre eficiencia energética, contabilización de consumos de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria y la lectura remota de estos.
  - **Real Decreto 390/2021**: actualiza el marco normativo a las nuevas calificaciones y certificaciones de eficiencia energética.

### **Real Decreto 235/2013**

Aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios. Derogado por el **Real Decreto 390/2021** citado anteriormente.

### **Ley 8/2013 de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas**

Potencia la rehabilitación y renovación de los edificios existentes, eliminando las trabas existentes y creando mecanismos específicos que la hagan viable y posible.

Resulta interesante el TFM de **Beatriz Pérez Martín** titulado “**Reducción de las demandas de calefacción, refrigeración y ACS, a lo largo de la evolución normativa**” (2020) [50] donde se compara las demandas de calefacción, refrigeración y ACS a lo largo de la normativa, la que se divide en cinco periodos: 1979-2006, 2007-2013, 2014-2020 y desde 2020. Entre las conclusiones obtenidas a lo largo del estudio, caben destacar las siguientes:

- A lo largo de su evolución, la legislación actúa restringiendo y reduciendo las demandas máximas con el fin de reducir consumos y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Más de la mitad de las viviendas fueron construidas con anterioridad a la entrada de la primera normativa energética (**NBE-CT79**), lo que resalta la importancia de la rehabilitación energética de los edificios.
- Se aprecian reducciones en las demandas de calefacción y de refrigeración de hasta el 90%, comparando la legislación actual con la existente en 1979.
- La demanda de ACS se ha mantenido imperturbable desde 1979, viéndose afectada únicamente por la zona climática.

## ANEXO II. MODELIZACIÓN DEL EDIFICIO Y RESULTADOS PRELIMINARES

### Introducción

Con el fin de entender y poder realizar de forma objetiva la elección del programa informático a emplear, se ha consultado la “**Guía técnica de procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios**” realizada por el **Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)**[12].

Actualmente, los programas informáticos comerciales tienen ciertas limitaciones: [12]

- Existen recursos para simular unidades terminales que transmiten la energía por convección, pero la simulación de unidades terminales por radiación aún se encuentra en desarrollo.
- La cuantificación de las pérdidas energéticas y caloríficas en el transporte no se ajustan a la realidad puesto que los datos para su dimensionamiento se reducen a unas pérdidas de presión para el caudal nominal y a unas pérdidas o ganancias térmicas por unidad de longitud. En estas entradas, se desprecia la influencia del bombeo en el consumo final o las pérdidas/ganancias térmicas de las redes en conjunto.
- No existe una interrelación entre la topología de la red, representación de las relaciones de vecindad entre los distintos elementos y tuberías, y la geometría de los elementos y tuberías. Por consiguiente, se obtienen resultados no completos que se agravan cuando existen lazos o bucles que aumentan el tiempo de computación.
- Los generadores o transformadores de un recurso, caracterizados por su eficiencia y su capacidad basadas en variables como la carga parcial, la temperatura exterior o de producción, son habitualmente simulados con un conjunto de ecuaciones algebraicas sin ninguna base física. Sin embargo, se está trabajando en el uso de modelos con base física, balances de energía y entropía, aunque, actualmente, son una minoría.
- Las pérdidas de eficiencia debidas a un arranque y una parada sucesiva del sistema, que a menudo se da en la realidad, suelen estar mal contempladas en los programas.

Además, existen dos aproximaciones a la resolución de los modelos de un edificio y sus sistemas que interrelacionan con él. Por un lado, DOE2, CALENER-GT, y CALENERVyP realizan una simulación en secuencia: primero calculan la demanda de energía del aire de las zonas definidas en el edificio, y, más tarde, calculan qué ocurre realmente cuando los sistemas actúan sobre la demanda calculada previamente para poder satisfacerla. Este método acelera el cálculo, pero se pierde parte de la interacción entre los sistemas, el edificio y los ocupantes. Por el contrario, EnergyPlus calcula todo simultáneamente, lo cual aumenta el tiempo de cálculo y presenta, a veces, dificultades de convergencia.[12]

Por otro lado, la influencia del factor humano, los ocupantes, es de enorme influencia, puesto que el número de ocupantes, la ocupación de la vivienda o los comportamientos energéticos generan divergencias entre viviendas idénticas. Cabe destacar el estudio de **van den Brom et al. (2019)** [13] donde se trataba dilucidar el porcentaje atribuible de la variación entre el valor teórico y el valor real de consumo energético es debido a los ocupantes o al propio edificio. Para ello, se tomaron datos de viviendas de Países Bajos y Dinamarca. Los datos provenían de viviendas con diferentes tipos de calefacción (redes de distrito y gas natural) y diferentes tipos de viviendas (unifamiliares y apartamentos). Los resultados obtenidos indicaban que el **50%** de la variación en la calefacción entre dos viviendas se puede explicar por las diferencias relativas a los ocupantes. El otro 50% se puede explicar por las características del edificio y otros parámetros físicos que habitualmente no son tenidos en cuenta en los modelos numéricos. Adicionalmente, destacaba que la influencia de los ocupantes difiere dependiendo de las características del edificio,

destacando que los edificios con mayor eficiencia energética se ven más influidos por los ocupantes.

Finalmente, cabe destacar el “Building Energy Performance Gap” (BEPG) o la “divergencia en el desempeño” entre las demandas calculadas numéricamente y la realidad de los consumos. **Calli et al. (2016)** [14] estudió la renovación de varios edificios construidos en la década de los años 50 y renovados para 2011 según siete conceptos que combinaban diferentes aislamientos y sistemas, enfrentando los resultados obtenidos numéricamente y esperados tras las renovaciones, y los consumos reales de los edificios a través de su monitorización durante los años 2011-2014. La divergencia entre ambos valores fue dispar según el año monitorizado: 117% en 2011, 107% en 2012, 41% en 2013 y 60% en 2014. Esta diferencia se explica por la no idealidad de la eficiencia de los sistemas y los fallos ocurridos en los sistemas instalados, la mala previsión de los comportamientos y consumos de los ocupantes, y la aleatoriedad en el comportamiento humano.

En la misma dirección apunta **Herrando et al. (2016)** [15] donde se estudió la certificación energética de los edificios de la Universidad de Zaragoza, a través de una modelización numérica con CALENER GT y su comparación con los valores reales medidos en electricidad y gas natural. Los edificios se dividen en dos grupos: académicos, donde se imparte clases, y de investigación. Se observa en los resultados una desviación media del 30% y entre los dos tipos de edificios existen discrepancias en la desviación media siendo superior en los edificios de investigación que, en los académicos, 45% frente a 23% de media, respectivamente. En el caso de los edificios académicos, el estudio aduce que la ocupación del edificio se modelizó con condiciones estándares que no se correspondían a la gran ocupación constante de los edificios. Por otro lado, en el caso de los edificios de investigación, los aportes debidos al equipamiento presente en los laboratorios no se modelizaron y, además, su modelización, en caso de incluirse, resultaría altamente compleja.

## Elección del programa

Se ha escogido el programa CYPETHERM HE Plus, que emplea para la simulación energética EnergyPlus 9.5, comercializado por CYPE, empresa que desarrolla y comercializa software técnico.

El programa se ofrece gratuito y está concebido para la certificación de la eficiencia energética de los edificios y la justificación de la normativa del CTE DB HE0 y HE1. Además, es un documento reconocido por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y por el Ministerio de Fomento. [11]

Dentro de este software, se incorpora el programa CteEPBD, elaborado por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC) en el marco del convenio vigente con el Ministerio de Fomento, que implementa la metodología de cálculo de la eficiencia energética de los edificios descrita en la norma EN ISO 52000-1:2017 de Eficiencia energética de los edificios. dentro del alcance de la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios (EPDB). [11]

A nivel de capacidades y limitaciones, el programa tiene las mismas que las de EnergyPlus 9.5. [11] Estas son la capacidad de obtener soluciones simultaneas de las condiciones de la zona térmica y de los sistemas de climatización sin asumir que los sistemas de climatización pueden alcanzar las cargas de las zonas y puede simular espacio no o sub acondicionados. Por otro lado, la solución está basada en un balance de calor de efectos radiantes y convectivos que producen cálculos de temperaturas de superficie, confort térmico y condensaciones. Finalmente, permite definir el paso de tiempo e incluye un modelo combinado de transferencia de calor y masa que tiene en cuenta el movimiento del aire entre zonas. [51]

## Modelización del edificio

El edificio por modelizar es un edificio ya existente compuesto por ocho viviendas, de las cuales dos son dúplex, con una planta baja con aparcamiento y trasteros.

### Climatología

Las modificaciones realizadas para adaptar el modelo climático a las condiciones climáticas de Zaragoza y que el programa genere un perfil de temperaturas con los datos suministrados son:

- Zonificación climática
  - Zona de invierno: D <sup>1</sup>
  - Zona de verano: 3 <sup>1</sup>
- Localización:
  - Altitud: 208 m <sup>2</sup>
  - Latitud: 41,7° <sup>2</sup>
  - Longitud: -0,9° <sup>2</sup>
  - Condiciones climáticas SCOP: Clima medio<sup>3</sup>
  - Orientación: 0° <sup>4</sup>

### Demanda diaria de ACS

Para el cálculo del agua caliente sanitaria (ACS), se recurre al Anejo F del **Documento Básico HE Ahorro de Energía** [16], obteniéndose una demanda de 851,2 l/día<sup>5</sup>. En el mismo documento, se indica que la temperatura de referencia es de 60°C.

Inicialmente, el aporte de energías renovables considerado a esta demanda es nulo. No obstante, si se tratará de una vivienda de nueva construcción se exigiría un mínimo de energía renovable en el ACS del 60% al poseer un consumo inferior a 5.000 l/día.

### Temperaturas de consigna

Se han tomado como valores de consigna los indicados en la *Tabla a-Anejo D. Condiciones operacionales de espacios acondicionados en uso residencial privado* del Anejo D del **Documento Básico HE Ahorro de Energía** [16] y los perfiles de uso, igualmente indicados en el Anejo citado.

### Cerramientos

Se considera que no existe ningún material aislante en los cerramientos exteriores o interiores de las viviendas, pero sí una cámara de aire entre dos elementos verticales compuestos por ladrillos. Tampoco, hay ningún material aislante en los forjados entre plantas.

Si que existe material aislante, lana de roca, en la cubierta y azotea con un espesor de 12 cm. La solera en contacto con el suelo dispone de poliestireno extruido expandido con espesor de 4 cm.

### Huecos

Las puertas y ventanas son elementos dispuestos en huecos que se producen en los cerramientos y, por ende, presentan puntos donde la transferencia térmica es importante. En el caso de las

---

<sup>1</sup> Documento Básico HE Ahorro de energía Anejo 2 Zonas climáticas.

<sup>2</sup> Instituto Geográfico Nacional e Instituto Nacional de Estadística.

<sup>3</sup> Decisión de la Comisión del 1 de marzo de 2013 (2013/114/UE).

<sup>4</sup> Ángulo para obtener la vertiente principal del tejado hacia el sur, para futura instalación fotovoltaica.

<sup>5</sup> Uso residencial privado; 3 dormitorios por vivienda; entre 4 y 10 viviendas en el edificio.

ventanas, el hueco es cubierto por un marco y un vidrio. En el caso de las puertas, puede darse, además, la tipología de ser completamente metálica o de madera.

- Ventanas y puertas acristaladas

El marco representa habitualmente entre el 25 % y el 35 % de la superficie del hueco y su transmitancia (U), dependiendo del material, se ve reflejada en la siguiente tabla. [17]

Material	Metálico	Metálico con RPT <sup>1</sup>	Madera	PVC
<b>Transmitancia térmica</b> [W/m <sup>2</sup> ·K]	5,7	4,0-2,5	2,2-2,0	2,2-1,0

Tabla 18. Transmitancia de los marcos según su material [17]

Por otro lado, las principales características del vidrio en el aislamiento térmico son su transmitancia térmica (U) y su factor solar (g). En la siguiente tabla, se recogen los valores dependiendo de su tipología.

Tipología	Sencillo	Vidrio aislante (UVA)	De control solar	De baja emisividad	Triple acristalamiento
<b>Transmitancia térmica</b> [W/m <sup>2</sup> ·K]	5,7	3,3-2,7	/	2,4-1,3	1,1-0,6
<b>Factor solar</b>	0,83	0,75	0,1-0,65	/	/

Tabla 19. Transmitancia y factor solar de los distintos tipos de vidrios [17]

En el documento llamado “**Guías IDAE 018: Soluciones de acristalamiento y cerramiento acristalado**” [17], se añade una tabla resumen donde se combinan todos los diferentes tipos de marcos con las diferentes tipologías de vidrios suministrando la transmitancia térmica resultante.

Se decide escoger para las ventanas y lucernarios un marco metálico con RPT y un vidrio aislante con una tipología 4-16-4<sup>2</sup>, resultando un valor global de 3,1 W/m<sup>2</sup>·K. El factor solar será de 0,75.

- Puertas macizas

Los valores de transmitancia térmica serán los dispuestos en la Tabla 18 sobre marcos, metálico y de madera, y tomando ese valor como el global.

Se considera que la puerta del garaje y la del ascensor son metálicas con una transmitancia térmica de 5,7 W/m<sup>2</sup>·K y el resto de las puertas, puertas de acceso y de paso, son de madera con una transmitancia térmica de 2,2 W/m<sup>2</sup>·K.

## Cargas térmicas

- **Ocupación**

La ocupación media de la vivienda, con tres dormitorios, será de 4 ocupantes, familia compuesta por dos progenitores y dos vástagos. Las zonas comunes tendrán un ocupante, dado su carácter de zona de paso. El resto de los recintos se considerarán con ocupación nula por ser de paso o de reducida estancia. Dependiendo de la actividad realizada, la tasa metabólica es diferente, valores que se reflejan en la siguiente tabla.

<sup>1</sup> RPT: Rotura de Puente Térmico

<sup>2</sup> 4 cm de vidrio-16 cm de cámara de aire-4 cm de vidrio.

<b>Actividad</b>	<b>Tasa metabólica [W/m<sup>2</sup>]</b>
Recostado	46
Sentado, relajado	58
Actividad sedentaria (oficina, vivienda, colegio, laboratorio)	70
De pie, actividad ligera (compras, laboratorio)	93
De pie, actividad media (dependiente, trabajo doméstico)	116

Tabla 20. Tasa metabólica por persona según la actividad realizada [21]

Por consiguiente, la ganancia interna de los ocupantes será de 70 W/persona, con una fracción sensible de 0,6<sup>1</sup> [22] y una fracción radiante de 0,36 (60% de la fracción sensible[22]).

Los perfiles de uso será los definidos en el Anejo D del **Documento Básico HE Ahorro de Energía** [16].

#### – Iluminación

Consultando la Sección HE 3 “*Condiciones de las instalaciones de iluminación*” del **Documento Básico de Ahorro Energético** [16], se desarrolla los conceptos de Valor de Eficiencia Energética de la Instalación (VEEI) límite y la potencia máxima de la iluminación de zonas comunes y aparcamientos (garaje). A continuación, se indica en Tabla 21 los valores obtenidos de la Tabla 3.2 del citado documento:

	<b>Garaje</b>	<b>Zonas comunes</b>	
<b>VEEI</b> <b>[W/m<sup>2</sup> por cada 100 lux]</b>	4	4	
<b>Potencia máxima</b> <b>[W/m<sup>2</sup>]</b>	5	≤ 600 lux	10
		> 600 lux	25

Tabla 21. VEEI y Potencia máxima para zonas comunes y garaje del edificio

A diferencia de los espacios anteriormente citados, no existe ninguna legislación referente a las instalaciones privadas. No obstante, los valores mostrados suponen un marco de referencia para la cuantificación de la potencia instalada, aunque pueda ser muy variable dependiendo de los lúmenes instalados y la tipología de bombilla empleada.

En el blog de **efectoLED** [19], empresa dedicada a la comercialización de bombillas LED, presentan un resumen de la iluminación recomendada para las diferentes estancias de la vivienda.

<b>Estancia</b>	<b>Iluminación [lx]</b>
Cocina	200
Baño	100
Pasillos y escaleras	100
Dormitorio	50-100
Salón/Comedor	100

Tabla 22. Recomendación de iluminación según la estancia [19]

Se considera un valor único de, aproximadamente, 150 lux (lm/ m<sup>2</sup>).

Por otro lado, las tipologías de bombilla presentan diferentes eficacias luminosas que se pueden observar en la Tabla 23.

<sup>1</sup> Porcentaje del total de carga sensible más carga latente.

<b>Tipo de bombilla</b>	<b>Incandescente</b>	<b>Halógena</b>	<b>Fluorescente/Bajo Consumo</b>	<b>LED</b>
<b>Eficacia luminosa [lm/W]</b>	16	30	105	130

Tabla 23. Eficacia luminosa de diferentes tipos de bombillas [18]

Aunque, actualmente a nivel de comercialización, los LEDs muestran eficiencias de aproximadamente de 130 lm/W, su desarrollo y mejora de su eficiencia es exponencial y se espera que superen los 200 lm/W a corto plazo.[18]

En cuanto a la fracción radiante y convectiva de las anteriores bombillas, se resumen en la siguiente tabla obtenida de un manual de un programa de la empresa **iMventa**.

<b>Tipo de luminaria</b>	<b>Fracción radiante</b>	<b>Fracción convectiva</b>
<b>Incandescente</b>	0,95	0,05
<b>Halógena</b>	/	/
<b>Fluorescente</b>	0,61	0,49
<b>LED</b>	1	0

Tabla 24. Fracción radiante y convectiva de los tipos de luminaria<sup>1</sup> [20]

Es destacable que la parte convectiva de la ganancia instantánea de calor se convierte inmediatamente en carga, sin embargo, la fracción radiante tiene primero que ser absorbida por paredes, suelo y mobiliario, por lo que aparece con cierto retraso.[20]

Dado que actualmente las bombillas incandescentes no pueden ser producidas o vendidas, se va a tomar una instalación de intermedia entre bombillas halógenas, fluorescentes y bajo consumo<sup>2</sup> (65 lm/W) para todas las viviendas, zonas comunes y garaje. La potencia a instalar por metro cuadrado, 4,40 W/m<sup>2</sup>, se toma del Anejo D del **Documento Básico HE Ahorro de Energía** [16]. La fracción radiante se fija en un valor medio de 0,80.

En cuanto a los perfiles de uso, se va a recurrir, también, al Anejo D del **Documento Básico HE Ahorro de Energía** [16], a excepción de las horas nocturnas donde la potencia será nula por considerarse que los ocupantes duermen y no hay iluminación.

#### – Aparatos eléctricos

Este valor es uno de los más complejos, dado que depende de los electrodomésticos y otros aparatos eléctricos existentes en la vivienda, su eficiencia energética y su uso. De forma preliminar, se toma el valor, 4,40 W/m<sup>2</sup>, y perfiles de uso definidos en el Anejo D del **Documento Básico HE Ahorro de Energía** [16]. La fracción radiante será de 0,70.[22]

#### – Ventilación

Aunque el edificio no es de obra nueva, se consulta la “**Guía técnica de climatización con equipos autónomos**” [21] de donde se encuentra la siguiente tabla:

<sup>1</sup> Fluorescente empotrada con pantalla. Los valores para bombillas halógenas no son detallados.

<sup>2</sup> Las bombillas halógenas ya no se producen desde septiembre de 2018, pero la compraventa de las unidades fabricadas antes del 31 de agosto de 2018 es posible. Se toma un valor medio, dado que en una vivienda conviven diferentes tipologías de bombillas y su sustitución es paulatina.

Estancias	Caudal de ventilación mínimo exigido [l/s]		
	Por ocupante	Por m <sup>2</sup> útil	En función de otros parámetros
Dormitorios	5	/	/
Salas de estar y comedores	3	/	/
Aseos y baños	/	/	15 por local
Cocinas	/	2	/
Trasteros y zonas comunes	/	0,7	/
Aparcamientos y garaje	/	/	120 por plaza

Tabla 25. Caudal de ventilación mínima exigida para viviendas

Dado que el edificio fue construido con otra legislación, no dispone de sistemas de ventilación mecánica. Para las viviendas, se introduce como valor de ventilación natural una renovación por hora entre las 7:00-9:00 en invierno y entre las 21:00-9:00 en verano con el fin de simular que las ventanas se encuentran abiertas durante ese periodo. En el caso de los demás recintos; zonas comunes, garaje y trasteros; se estima que la ventilación es un 33% de la marcada en la Tabla 25.

Por otro lado, hay que destacar las infiltraciones, entrada de aire indeseadas, que suponen otro factor para tener en cuenta. Al tratarse de un aspecto extenso y complejo, se decide dimensionarlas con los valores predeterminados que el programa indica.

### Sistemas de climatización

Las viviendas disponen de un sistema comunitario de calefacción y agua caliente sanitaria a través de dos calderas de condensación con potencia nominal individual de 20 kW, rendimiento del 0,96 y alimentadas con gas natural. La transferencia del calor a las viviendas se realiza a través de radiadores.

No existe ningún sistema común de refrigeración en el edificio. No obstante, se estima que la preinstalación estaba realizada cuando se construyó el edificio y los ocupantes de todas las viviendas disponen de un aire acondicionado de conducto único. Según el **Reglamento Delegado (UE) N° 626/2011**, la escala energética es la siguiente, a falta de la nueva directiva para la armonización a la escala A-G.

Clase de eficiencia energética	EER
A <sup>+++</sup>	$\geq 4,10$
A <sup>++</sup>	$3,60 \leq \text{EER} < 4,10$
A <sup>+</sup>	$3,10 \leq \text{EER} < 3,60$
A	$2,60 \leq \text{EER} < 3,10$
B	$2,40 \leq \text{EER} < 2,60$
C	$2,10 \leq \text{EER} < 2,40$
D	$1,80 \leq \text{EER} < 2,10$
E	$1,60 \leq \text{EER} < 1,80$
F	$1,40 \leq \text{EER} < 1,60$
G	$< 1,40$

Tabla 26. Clase de eficiencia energética de sistemas de refrigeración de conducto único y su EER [Reglamento Delegado (UE) N.º 626/2011]

Como se comenta en el **ANEXO I** según el **Reglamento 2017/1369/UE**, las clases de eficiencia energética pasan a ser de la A a la G, siendo A la nueva A<sup>+++</sup>. Por consiguiente, se escoge un aire acondicionado con prestaciones modestas, clase D, y con un EER de 2,70.

## Demandas y consumos previos a la rehabilitación

Tras haber introducido todos los datos en el modelo numérico se procede a simular las demandas y los consumos del edificio durante el periodo de un año. En las dos siguientes tablas, se presentan los resultados obtenidos.

	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>	<b>Tot.</b>
<i>1ªA</i>	11,57	8,50	7,62	4,91	3,12	-	-	-	-	0,37	6,16	11,53	53,78
<i>1ªB</i>	12,30	9,24	8,29	5,32	3,44	-	-	-	-	0,48	6,82	12,31	58,20
<i>2ªA</i>	5,83	3,28	2,90	1,70	0,94	-	-	-	-	0,05	2,20	5,56	22,45
<i>2ªB</i>	5,86	3,33	2,89	1,63	0,92	-	-	-	-	0,06	2,23	5,61	22,53
<i>3ªA</i>	5,80	3,17	2,73	1,52	0,82	-	-	-	-	0,05	2,19	5,50	21,76
<i>3ªB</i>	5,76	3,15	2,66	1,42	0,77	-	-	-	-	0,05	2,17	5,47	21,45
<i>4ªA</i>	10,34	6,81	5,36	2,95	1,56	-	-	-	-	0,33	5,49	9,94	42,78
<i>4ªB</i>	10,27	6,75	5,27	2,82	1,51	-	-	-	-	0,32	5,44	9,89	42,25
<b>Tot.</b>	8,77	5,74	4,81	2,8	1,61	-	-	-	-	0,23	4,32	8,51	36,80

Tabla 27. Energía por metro cuadrado (kWh/m<sup>2</sup>-año) de calefacción necesaria por mes y en total en las viviendas

	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>	<b>Tot.</b>
<i>1ªA</i>	-	-	-	-	-	0,91	2,93	3,63	2,31	-	-	-	9,78
<i>1ªB</i>	-	-	-	-	-	0,85	2,83	3,47	2,12	-	-	-	9,28
<i>2ªA</i>	-	-	-	-	-	1,41	3,72	4,23	3,02	-	-	-	12,38
<i>2ªB</i>	-	-	-	-	-	1,45	3,84	4,29	3,04	-	-	-	12,63
<i>3ªA</i>	-	-	-	-	-	1,62	4,06	4,53	3,22	-	-	-	13,44
<i>3ªB</i>	-	-	-	-	-	1,69	4,22	4,63	3,28	-	-	-	13,82
<i>4ªA</i>	-	-	-	-	-	1,74	4,39	4,94	3,06	-	-	-	14,13
<i>4ªB</i>	-	-	-	-	-	1,84	4,58	5,10	3,17	-	-	-	14,69
<b>Tot.</b>	-	-	-	-	-	1,50	3,94	4,47	2,94	-	-	-	12,84

Tabla 28. Energía por metro cuadrado (kWh/m<sup>2</sup>-año) de refrigeración necesaria por mes y en total en las viviendas

De los resultados obtenidos cabe destacar lo siguiente:

- Los consumos de calefacción en los pisos intermedios, 2º y 3º, son inferiores puesto que colindan con recintos habitables y calefactados.
- El 1º y 4º piso presentan consumos de calefacción superiores, dado que colindan con el garaje y la cubierta, respectivamente, que son o recintos no calefactados o el exterior.
- Los consumos de refrigeración siguen un crecimiento lineal según se asciende en el edificio. El garaje favorece un consumo de refrigeración inferior en el primer piso.
- Se observan demandas de calefacción muy bajas en octubre. Por consiguiente, el encendido de la caldera deberá realizarse como pronto en noviembre.

A nivel de calificación energética, es necesario acudir al documento del IDAE “**Calificación de la eficiencia energética de los edificios**” [52] y consultar los datos contenidos en el Anejo IV sobre la escala energética en edificios de apartamentos en clima D3. A continuación, se presenta en forma de escala realizada por el propio programa utilizado, dado que dispone de los datos pertinentes, y que concuerda con lo establecido en el documento anteriormente citado.

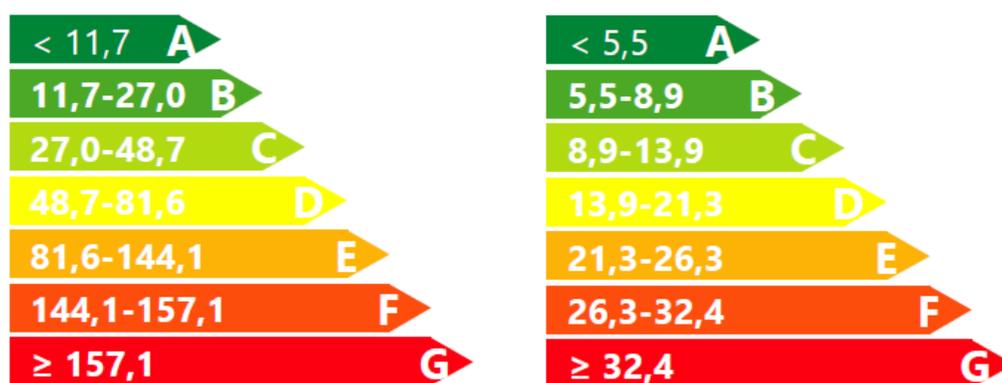


Ilustración 8. Escalas de las demandas de calefacción y refrigeración en edificio de apartamentos y clima D3 en kWh/m<sup>2</sup>

Por consiguiente, podemos observar que, a nivel global del edificio, las demandas de calefacción se posicionarían en la escala C y las demandas de refrigeración, también, en la escala C. No obstante, la diferencia de demandas entre viviendas resulta considerable posicionándose entre las escalas B y D para calefacción y refrigeración.

Por otro lado, a nivel de consumos:

Electricidad		Gas natural	
Concepto	Consumo [kWh/año]	Concepto	Consumo [kWh/año]
Iluminación	17.994,50	Calefacción	33.937,12
Aparatos eléctricos	12.396,50	ACS	22.041,26
Bombas de circulación	1.685,80		
Sistemas de refrigeración	4.655,5		

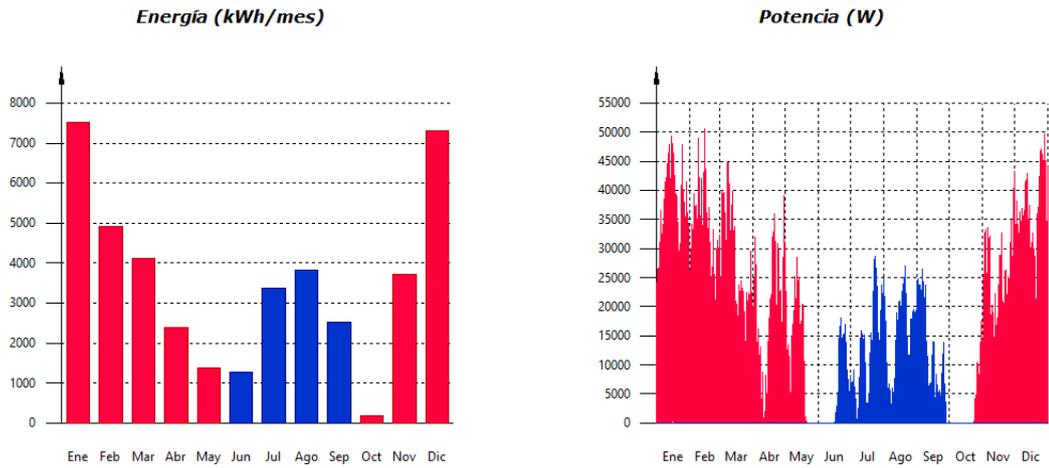
Tabla 29. Consumos de electricidad y gas natural del edificio por conceptos

El propio programa ofrece la calificación energética respecto a la energía primaria utilizada y a las emisiones de CO<sub>2</sub> emitido de la calefacción, la refrigeración y el ACS<sup>1</sup>. Los valores obtenidos en el caso de la energía primaria son, respectivamente, 40,54 kWh/m<sup>2</sup>·año, 9,78 kWh/m<sup>2</sup>·año y 28,46 kWh/m<sup>2</sup>·año, siendo sus calificaciones energéticas de C, C y G. Por otro lado, los valores de emisiones son, respectivamente, 8,43 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·año, 1,66 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·año y 6,03 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·año, siendo sus calificaciones energéticas B, B y G.

Se puede observar que, mientras que la calefacción y la refrigeración tienen ambas calificaciones energéticas altas, el ACS posee la peor de las calificaciones energéticas debido a las pérdidas durante su transporte y a las ocurridas en el acumulador.

En las siguientes imágenes, se observa un histograma con la energía, calefacción y refrigeración, demandada por mes y la potencia de calefacción y refrigeración requerida a lo largo del año para cubrir estas demandas. A este histograma habría que añadirle la energía y potencia requerida para satisfacer las demandas de ACS.

<sup>1</sup> La calificación energética de la iluminación no es necesaria por ser un edificio de carácter residencial privado. Solo es necesario en edificios del sector terciario. [52]



*Ilustración 9. Energía consumida global del edificio por meses y potencia diaria global del edificio requerida*

Se observa una potencia requerida media de calefacción de 35 kW (con picos de hasta 45 kW) y de refrigeración de 15 kW (con picos de hasta 25 kW). Se observa también que los consumos de calefacción en los meses de mayo y octubre son reducidos.

## ANEXO III. ELECCIÓN DE LOS SISTEMAS PARA CALEFACCIÓN Y ACS

En busca de la mejora de la eficiencia energética de las instalaciones, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la electrificación de las viviendas, se dirige la mirada hacia las bombas de calor.

### Introducción

Definidas como máquinas térmicas que toman energía del entorno natural (el aire, el agua y la tierra) o residual y, mediante un ciclo de refrigeración, la transporta al interior de los edificios, calentándolos. Además, también puede trabajar inversamente transfiriendo el calor del interior de los edificios al exterior, refrigerándolos. Con el fin de producir la transferencia de energía se consume energía eléctrica, si se utiliza un ciclo de compresión, o energía térmica, en el caso de un ciclo de absorción.

A continuación, se detallan los diferentes tipos de focos de los que se puede tomar el calor y sus configuraciones y características más destacables.

#### Aire

Engloba tanto la configuración aire-aire como la aire-agua. Es la más común puesto que su operación es sencilla y tiene bajos costes de instalación. No obstante, su capacidad calorífica se ve afectada con el decremento de la temperatura, desplazando su uso en climas fríos.<sup>1</sup> [28]

#### Agua

Engloba tanto la configuración agua-agua como el agua-aire y utiliza fuentes naturales como ríos, estanques o lagos. El agua presenta una mayor densidad y, aproximadamente, cuatro veces mayor capacidad de calor específico que el aire. Además, contiene mayor energía por volumen que el aire y un menor rango de temperaturas. Por lo tanto, su COP puede ser superior a las de aire porque el refrigerante puede absorber más calor en el evaporador. No obstante, el clima puede afectar a las masas acuáticas utilizadas que pueden reducir el rendimiento. Por otro lado, la mala calidad del agua puede ocasionar obstrucciones y corrosión en los intercambiadores. [28]

#### Suelo/Tierra

Presenta altos costes de inversión y de superficie, pero supone una buena elección en climas fríos donde el subsuelo se mantiene a una temperatura más caliente y estable. [28]

Se presenta en dos tipologías, circuito abierto o cerrado. Sus rendimientos son similares, aunque ligeramente superiores los abiertos, tanto el COP (3,8-5,0 vs. 3,2-4,2) y como el EER (19,1-27,5 vs. 14,6-20,4)<sup>2</sup>.

### Aspectos medioambientales

Caben destacar los fluidos caloportadores, los refrigerantes. Una de sus propiedades más importante es el valor de potencial de calentamiento global (GWP), definido<sup>3</sup> como “Capacidad de un gas de efecto invernadero de influir en el forzamiento radiativo, expresada en términos de

---

<sup>1</sup> Según NORDICGHP, comparando dos bombas de calor (aire y geotérmica), la de aire presenta una reducción del COP de, aproximadamente, 5 (18,3°C) a 1,5 (-20,6°C), siendo 3 a 0°C. [82]

<sup>2</sup> Datos obtenidos de la publicación del Gobierno de Canadá relativa a bombas de calor [83].

<sup>3</sup> Diccionario panhispánico del español jurídico de la Real Academia Española, 2022

una sustancia de referencia y un horizonte temporal”. De forma habitual, la sustancia de referencia es el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) y el horizonte temporal, 100 años.

De todos ellos, se van a destacar los más utilizados a lo largo de la historia, basándose en la información recabada en la revisión realizada por **Paul Byrne (2022)** [29].

#### Clorofluorocarburos (CFC) e Hidroclorofluorocarburos (HCFC)

Utilizados desde la década de los 30 por sus buenos rendimientos, se dejaron de emplear tras la aprobación del Protocolo de Montreal (1987) dada su capacidad de romper las moléculas de ozono, por la presencia de cloro, y debilitar la capa de ozono.

#### Hidrofluorocarburos (HFC)

No contienen cloro y, por lo tanto, no afectan a la capa de ozono y son buenos sustitutos para los CFC y los HCFC. No obstante, poseen altos valores de potencial de calentamiento global que intensifican el calentamiento climático y, por ende, podrían ser prohibidos en un futuro cercano.

#### Hidrofluoroolefinas (HFO)

Son HFCs insaturados y presentan valores bajos de potencial de calentamiento global dado su corta vida en la atmosfera. No obstante, en su descomposición se produce trifluoroacético que presenta riesgo de acidificación de las lluvias. Además, tienen ligera inflamabilidad. Por esta razón, se está estudiando su mezcla con otros compuestos.

#### Amoníaco (R717, NH<sub>3</sub>)

No afecta a la capa de ozono y no contribuye al calentamiento global, pero sí que contribuye a la acidificación del agua y el suelo. Además, es tóxico, inflamable, explosivo y corrosivo al cobre y sus aleaciones. Sin embargo, sus prestaciones son muy superiores al resto de refrigerantes. Por estas razones, se utiliza casi exclusivamente en instalaciones industriales.

#### Hidrocarburos (HC)

Utilizados en viviendas y en locales comerciales desde antes de la década de los 30 han ido siendo sustituidos por las regulaciones debido a su alta inflamabilidad. Los más utilizados son el propano (R290) y el isobutano (R600a), quienes no son tóxicos, su poder de potencial de calentamiento global es de 2-3 y no afectan a la capa de ozono.

#### Dióxido de Carbono (R744, CO<sub>2</sub>)

Uno de los primeros fluidos utilizados, fue completamente abandonado en favor de los CFCs. No afecta a la capa de ozono y su potencial de calentamiento global es igual a 1. Se distingue por su baja temperatura crítica y sus altas presiones de trabajo. No obstante, posee un ciclo termodinámico transcrito, dado que habitualmente se trabaja a temperaturas superiores a la crítica. Actualmente, no es utilizado en el sector doméstico, dado que su ciclo termodinámico es un 30 % menos eficiente que con el R134a (HFC). Sin embargo, por razones medioambientales y legales, el CO<sub>2</sub> está emergiendo otra vez como solución.

En la siguiente ilustración, se puede observar la evolución y futuro del uso de los refrigerantes anteriormente citados.

## EVOLUCIÓN Y FUTURO

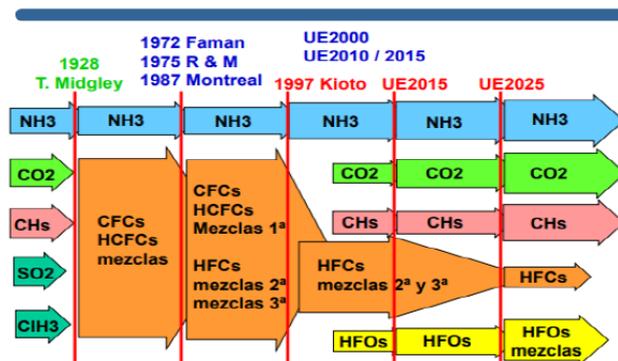


Ilustración 10. Evolución y futuro de los fluidos refrigerantes [53]

Uno de los gases más utilizados es el R410a<sup>1</sup>, compuesto por mezcla casi azeotrópica compuesta por los gases HFC R125 (Pentafluoroetano) y R32 (Difluorometano). Sustituyó al R22 dada su inocuidad a la capa de ozono, pero posee un potencial de calentamiento global alto, 2088. Por esta razón, la Unión Europea realizó un estudio sobre la disponibilidad de refrigerantes para sistemas de refrigeración que puedan remplazar los gas fluorados existentes o reduzcan el impacto climático [30]. En la siguiente tabla se recogen los gases propuestos con sus características y propiedades más destacadas.

	GWP	Inflamabilidad	Mercado y producción	Coste <sup>2</sup>	Eficiencia energética <sup>2</sup>
<b>Alternativas sintéticas (gases fluorados) con GWP medio</b>					
<b>R32 (HFC)</b>	675	Poco inflamable (A2L)	Comercializado en la UE	Igual	Mejor
<b>R452B<sup>3</sup></b>	698	Poco inflamable (A2L)	No	No disponible	Similar
<b>R454B<sup>4</sup></b>	466	Poco inflamable (A2L)	No	No disponible	Similar
<b>R466A<sup>5</sup></b>	733	No inflamable (A1)	No	No disponible	Similar
<b>R448B<sup>6</sup></b>	296	Poco inflamable (A2L)	No	No disponible	Buena eficiencia en climas cálidos
<b>R447A<sup>7</sup></b>	583	Poco inflamable (A2L)	No	No disponible	Similar
<b>Alternativas sintéticas (gases fluorados) con GWP bajo</b>					
<b>R161 (HFC)</b>	12	Inflamable (A2)	No, en estudio	No disponible	Mejor
<b>R152a (HFC)</b>	124	Inflamable (A2)	No	No disponible	Sin información
<b>R454C<sup>8</sup></b>	148	Poco inflamable (A2L)	No	Más caro	Sin información

Tabla 30. Refrigerantes sustitutos y sus características más destacables

<sup>1</sup> Consultar el apartado “Análisis de mercado” para comprender esta afirmación.

<sup>2</sup> Comparado con R410A

<sup>3</sup> Mezcla de HFCs (R32 y R125) y HFO-1234yf

<sup>4</sup> Mezcla de HFCs (R32) y HFO-1234yf

<sup>5</sup> Mezcla de HFCs (R32 y R125) y trifluoroyodometano (CF<sub>3</sub>I)

<sup>6</sup> Mezcla de HFCs (R32 y R52a) y HFO-1234yf

<sup>7</sup> Mezcla de HFCs (R32 y R125) y HFO-1234ze

<sup>8</sup> Mezcla de HFCs (R32) y HFO-1234yf

El estudio indica la preferencia hacia gases naturales (propano y propileno) dado sus bajos GWP, 2 y 3, respectivamente. No obstante, son muy inflamables y en muchos países la normativa es estricta. Por consiguiente, se concluye que se debe realizar la transición hacia el R32 a la espera de la investigación, producción y comercialización de refrigerantes con menor GWP.

## Aspectos legales

A nivel de legislación española, existe una “tasa de carbono” sobre los gases fluorados a través de la **Ley 16/2013**, por la que se establece que los hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF6) son susceptibles de tipo impositivo por unidad de peso (kg) dependiendo de su potencial de calentamiento atmosférico según lo dispuesto en el *apartado Once del artículo 5* [54]. No obstante, el tipo máximo es de 100 €/kg. La venta al exterior o los gases con potencial de calentamiento atmosférico inferior a 150 están exentos de este gravamen.

Posteriormente, la **Ley 6/2018**, de Presupuestos Generales, modificó el artículo 5.11 y, recientemente, **Ley 14/2022**, modificó el artículo 5 estandarizando el peso del gas empleado según el uso final y traspasando el gravamen, de facto, de los productores a los fabricantes y usuarios de los gases. No obstante, el tipo máximo se mantiene y, también, la exención a gases con potencial de calentamiento atmosférico inferior a 150 o exportados.

Desde 2025, el uso de gases fluorados con un GWP superior a 750 estarán prohibidos en la Unión Europea en pequeños sistemas con cargas de refrigerante inferiores a 3kg según el **Reglamento UE N.º 517/2014**.

## Análisis de mercado

Se consulta el TFG de Santiago Palos “**Bomba de calor por compresión para sistemas de distrito: recopilación de equipos comercialmente disponibles y análisis de sus principales características para la simulación de sistemas**” [6], donde se recopilan de la base de datos de **Eurovent** todas las bombas de calor con potencia superior a 100kW. Aunque el estudio está dirigido hacia las redes de distrito, cabe destacar varios indicadores:

- Las bombas de calor agua-agua tiene un mayor COP y EER, un 50% superior, que las aire-agua. No obstante, a nivel de comercialización las aire-agua tienen mayor presencia.
- La mayoría, 91%, son reversibles.
- El 98% de las bombas utilizan refrigerantes con alto potencial de calentamiento global, 1430-2088. El más utilizado es el R410A con un 75% de la cuota de mercado.
- El compresor “scroll” no tiene gran rango de operación, pero cubre las potencias bajas (inferiores a 100 kW). Los tipos “tornillo” o el “alternativo” también se encuentran en este rango.

Por otro lado, en el TFM de Jorge Roche “**Bombas de calor de gran potencia para sistemas de calefacción y refrigeración de distrito. Caracterización del funcionamiento a carga parcial**”[7], donde se consideran también bombas de calor con potencia superior a 100 kW destaca la preponderancia de Carrier y CIAT, como fabricantes, al poseer las bombas con mayor COP.

Con estos indicadores, se procede a consultar los catálogos de Carrier, CIAT, Trane, AERMEC y Climaveneta; y completar el “agujero” existente en los dos anteriores trabajos. El total de máquinas de bombas de calor analizadas asciende a 84.

En los siguientes gráficos, se puede observar la distribución de las máquinas de bomba de calor de potencias inferiores a 100 kW de los fabricantes citados.

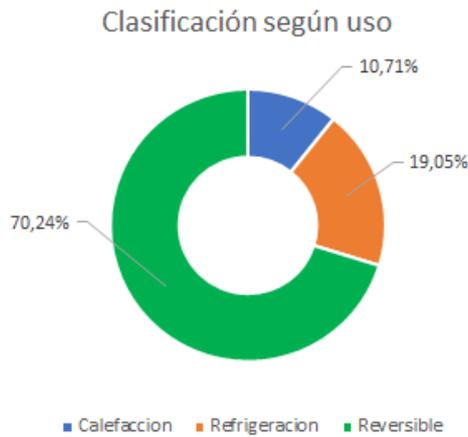


Ilustración 11. Clasificación según uso [Elaboración propia]

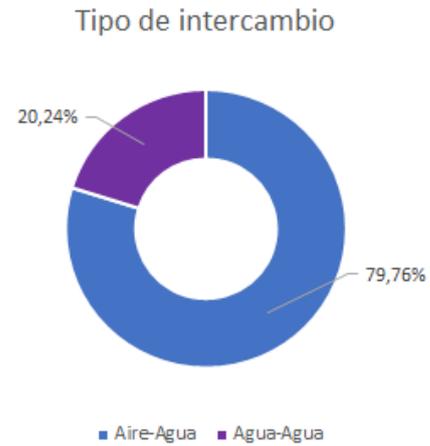


Ilustración 12. Tipo de bomba de calor [Elaboración propia]

Por otro lado, en el siguiente gráfico se detalla la tecnología de compresión de las máquinas.

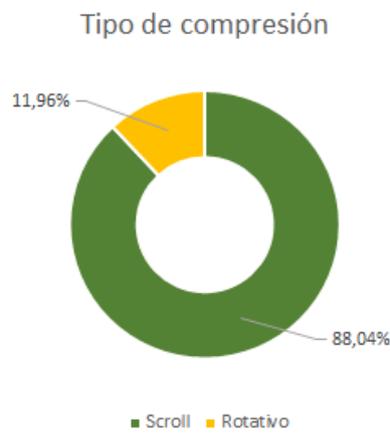
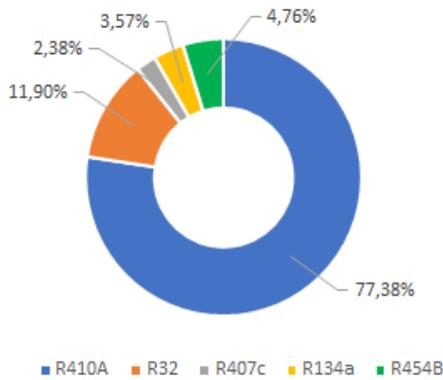


Ilustración 13. Clasificación según tipo de compresión [Elaboración propia]

Como ya se había indicado anteriormente, la tecnología principal en potencias pequeñas, inferiores a 100 kW, es el tipo “scroll” y en menor medida el rotativo.

En el último gráfico, se muestra el refrigerante utilizado en el ciclo de compresión y, posteriormente, los refrigerantes utilizados en cada una de las marcas estudiadas.

Distribución por refrigerante



Refrigerante	GWP
R410A	2088
R407c	1774
R134a	1430
R32	675
R454B	466

Ilustración 14. Distribución según el refrigerante [Elaboración propia]

Tabla 31. Refrigerante y su potencial de calentamiento global [Elaboración propia]

Distribución por refrigerante y marca

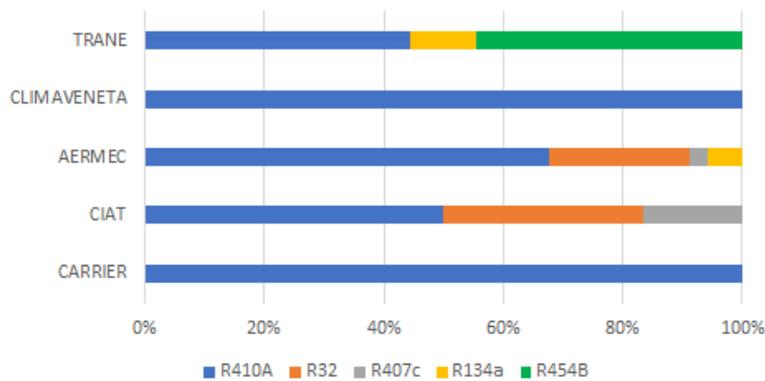


Ilustración 15. Distribución del uso de los refrigerantes por marca [Elaboración propia]

Por las necesidades energéticas, calefacción y ACS, el estudio de la eficiencia energética de las máquinas en estudio, se centra en las bombas de calor que suministren el agua de salida de la máquina a una temperatura de, al menos, 65°C. De todos los modelos estudiados, se encuentran 3 máquinas, 2 de Carrier y 1 de CIAT con un total de 28 modelos, que disponen datos del rendimiento, COP, a esta temperatura de salida.

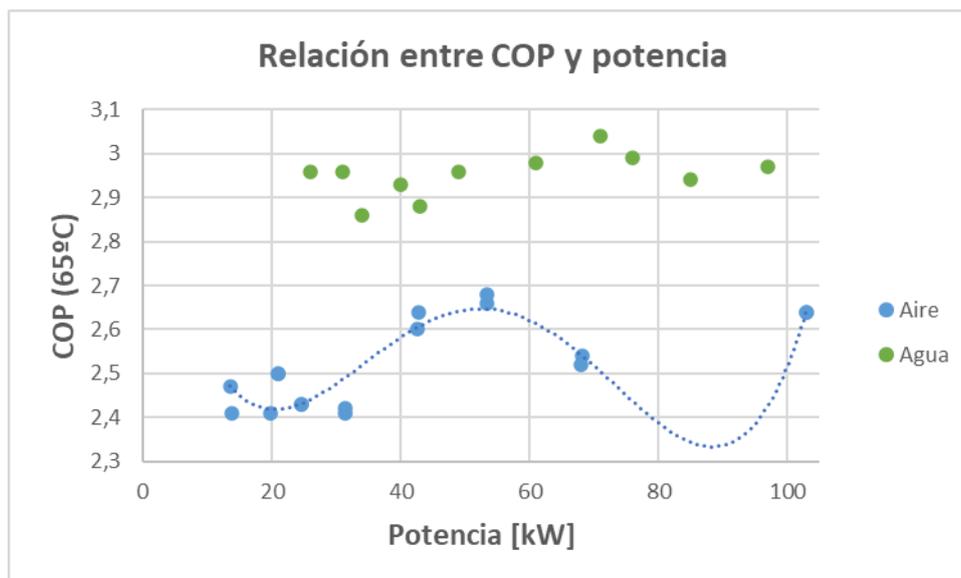


Gráfico 11. Relación entre el COP con salida de agua a 65°C con la potencia de las máquinas para tipologías de aire-agua y agua-agua [Elaboración propia]

Es patente que el gráfico se divide en dos grupos de modelos. Los modelos con mayor rendimiento son los relativos a la bomba de calor de agua-agua de Carrier, mientras que los modelos con menor rendimiento son las dos bombas de calor aire-agua restantes de Carrier y CIAT.

Dado que la utilización de una bomba de calor agua-agua sin una masa de agua cercana supondría un gasto fijo muy alto, el tipo de bomba de calor debe ser aire-agua. Por consiguiente, se incluye en el gráfico una línea de tendencia con el fin de conocer de forma aproximada la evolución del COP con el aumento de la potencia de las máquinas. La línea polinómica de grado cuatro<sup>1</sup> se ajusta con alta corrección a los valores ( $R^2$  es 0,81), aunque el número de valores no sea excesivamente elevado.

## Elección de la bomba de calor

Como se ha comentado con anterioridad, se busca sustituir las calderas de condensación existentes y alimentadas por gas natural por una bomba de calor que satisfaga las demandas de calefacción y agua caliente sanitaria.

Como se indica en Ilustración 9, la potencia media requerida para la calefacción es de 35 kW con picos de hasta 45 kW. Por consiguiente, resulta necesario disponer de al menos de una bomba de calor de 60 kW para satisfacer las necesidades descritas.

Por lo tanto y aplicando la ecuación de la línea polinómica descrita en el Gráfico 11 el COP de la bomba de calor será 2,62. Además, el factor de rendimiento medio estacional por defecto ( $SCOP_{net}$  o SPF), es de 2,60; según el Cuadro 1 de la **Decisión 2013/114/UE** de la Comisión Europea. [55]

El programa utilizado, CYPETHERM HE Plus, presenta ciertas particularidades en la adición de los equipos presentes en el edificio. Se ofrece la posibilidad de insertar en el cálculo de la demanda de ACS un sistema de bomba de calor, introduciendo como datos: su tipo de vector energético, su potencia y su rendimiento medio estacional. Sin embargo, al introducir el rendimiento medio estacional se desprecia la influencia de la temperatura en el rendimiento de la bomba de calor.

<sup>1</sup> Con el fin de facilitar la visualización del gráfico, no se incluye la ecuación de la línea de tendencia. Esta es:  $y = 2,02872 \cdot 10^{-7} \cdot x^4 - 4,36546 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 3,05406 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 7,71745 \cdot 10^{-2} \cdot x + 3,05699$

Por otro lado, existe la opción de elegir entre un reducido catálogo de 5 marcas una bomba de calor para ACS con acumulador incluido.

Además, en el caso de los sistemas de calefacción o refrigeración no existe la opción de introducir un valor de rendimiento medio estacional y se reduce a la elección de una bomba de calor de un escaso catálogo de 8 marcas entre las que no se encuentran ninguna de las anteriormente estudiadas en el **ANEXO III** y con potencias limitadas a un máximo de 30 kW.

Dadas las limitaciones citadas, es necesario elegir una de las bombas de calor existentes en el catálogo, aunque sus prestaciones sean ligeramente diferentes. La bomba elegida es de la marca Midea, tiene una potencia nominal de 30,10 kW y un COP nominal de 3,91. Dado que la potencia nominal no satisface la dimensionada, 60 kW, se introduce una bomba de calor por cada dos pisos, es decir, por cada cuatro viviendas. Por otro lado, el ACS se producirá con estas mismas bombas. La alimentación eléctrica de la bomba de calor es trifásica y su compresor es rotatorio.

Los resultados obtenidos de la simulación indican que el consumo anual de electricidad por parte de las bombas de calor es de 11.880 kWh para la calefacción y un rendimiento medio estacional de 2,66. En cuanto al consumo de electricidad anual para ACS es de 6.690 kWh. El consumo energético se reduce en un 67% en la energía final y un 40% la energía primaria utilizada.

# ANEXO IV. INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

## Introducción

La energía radiada por el Sol es, aproximadamente, un 7% luz ultravioleta, un 47% luz visible y el resto, un 46%, luz infrarroja. La energía recibida a la distancia de la Tierra es de, aproximadamente, 1,4 kWh/m<sup>2</sup>. No obstante, al atravesar la atmósfera solo un 47% de la energía alcanza la superficie, 700.000 GWh/año. Esta energía recibida supone 14.000 veces la energía, 50 GWh, consumida por la humanidad en un año. Por consiguiente, su potencial es enorme. [56]

El aprovechamiento de la energía solar se puede clasificar en dos grupos: la fotovoltaica y la térmica.

La fotovoltaica está destinada exclusivamente a la producción directa de electricidad mediante módulos fotovoltaicos, los cuales, al recibir la luz de forma directa, se ionizan y liberan electrones que al interactuar entre sí generan corriente eléctrica.

En la térmica, se utilizan colectores o captadores solares para transformar la radiación solar en calor que se transfiere a fluidos caloportadores con el fin de servir como apoyo en los consumos de calefacción o de agua sanitaria caliente. Una de sus variantes es la energía termosolar por concentración donde a través de espejos o lentes se reflejan los rayos solares hacia una superficie concreta. Este calor se destina a la producción de vapor a presión para la producción de electricidad.

## Análisis de mercado

A nivel mundial, la potencia instalada de energía solar fotovoltaica superó los 1.100 GW (2021) y supuso un 3,6% de la electricidad generada mundialmente (2021). Los países con mayor instalación anual son China y la Unión Europea [23], [24]

A nivel de la Unión Europea, se ha crecido de una potencia instalada de 52 GW en 2011 a 160 GW en 2021, un 207% de crecimiento en 10 años. Este incremento se ha producido por las políticas energéticas llevadas a cabo a través de subsidios que han reducido los costes un 82% en la última década. [25] Además, la energía solar supuso un 5,2% de la electricidad generada en 2020 en la Unión Europea. A futuro, se desea alcanzar la cifra de 320 GW para 2025 y de 600 GW para 2030. [26]

A nivel estatal, la potencia instalada de energía solar alcanza los 20,24 GW, siendo 17,936 GW fotovoltaica y 2,304 GW térmica, de un total de potencia instalada de 116,8 GW, suponiendo el 17,3% del total de potencia instalada. [27]

El crecimiento de estas tecnologías ha sido dispar según la tecnología. La energía solar fotovoltaica gracias a la legislación que posteriormente se desarrolla, ha crecido enormemente, un 275% en 5 años y un 17% del año 2021 al 2022. No obstante, la energía solar térmica lleva estancada en las mismas potencias desde 2013. [27]

## Legislación

La normativa ha sufrido muchas variaciones, pero la más llamativa fue el “Impuesto al sol” o cargo transitorio por energía autoconsumida producida.

Impuesto aprobado con el **Real Decreto 900/2015** se fundamentaba en que, aunque las instalaciones de autoconsumo suponían un ahorro de los costes, las instalaciones continuaban conectadas a red, utilizándola cuando la producción de energía era insuficiente, es decir, durante días nublados o por la noche. Por consiguiente, se infería que el resto de los consumidores también estarían pagando una parte de autoconsumo. No obstante, la razón real fue hacer frente a una deuda del gobierno con las distribuidoras, conocida como “déficit tarifario”.

El impuesto se eliminó en 2018 con el **Real Decreto Ley 15/2018** dado que se pagaba dos veces lo mismo, los peajes de acceso; era un obstáculo para el desarrollo de las energías renovables; suponía un gasto burocrático; e imposibilitaba el autoconsumo compartido, siendo viable ahora en el mismo edificio o si la distancia es inferior a 500 metros ortogonalmente.

Además, en 2019 se aprobó la normativa de autoconsumo mediante el **Real Decreto 244/2019** que simplificó los trámites administrativos con el fin de incentivar las instalaciones de energía solar. Además, permitió la modalidad de autoconsumo con excedentes donde los consumidores reciben una compensación económica por sus sobrantes energéticos.

Por otro lado, las subvenciones y ayudas a este tipo de tecnología han aumentado de forma sustancial en todos los niveles de la Administración Pública de España. A continuación, se detallan algunas de ellas.

A nivel estatal, existe una deducción del Impuesto sobre la Renta de las Personas Físicas (IRPF), aprobada mediante el **Real Decreto Ley 19/2021**, si se justifica una reducción de las demandas de calefacción y refrigeración. Esta deducción puede ser del 20%, 40% o el 60% según las mejoras energéticas realizadas y alcanzadas.

A nivel estatal pero gestionado por las Comunidades Autónomas, se encuentran los programas de incentivos para particulares, industrias y empresas que realicen inversión en autoconsumo, almacenamiento y usos térmicos de energías renovables. Aprobado mediante el **Real Decreto 477/2021** y ampliado mediante el **Real Decreto 377/2022**, se encuentra vigente hasta el 31 de diciembre de 2023 y está dotado de 660 millones de euros distribuidos entre las Comunidades y Ciudades Autónomas a través del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia y los Fondos Europeos *Next Generation*. Tras la aprobación de la **Ley 10/2022**, las ayudas no se integrarán en la base imponible del IRPF. [57]

Finalmente, a nivel municipal existen bonificaciones del Impuesto sobre los Bienes Inmuebles (IBI), así como, iniciativas de ayudas a la rehabilitación de los edificios donde se puede llegar a subvencionar hasta el 75% de la actuación realizada.

## Proyecto

El edificio presenta dos cubiertas, una orientada hacia el sur y una hacia el norte. Dada la inclinación natural, su mayor superficie y su orientación, se escoge la vertiente sur. La tecnología que instalar, dadas las necesidades energéticas del edificio, será la fotovoltaica.

Cabe destacar que en la cubierta tiene una inclinación de 12° y en ella existen cuatro lucernarios sobre los que no se puede realizar la instalación de ningún panel. En el resto de área libre, se puede realizar la instalación de 30 paneles de 460 Wp de la marca **JA Solar**, obteniendo una potencia pico de 13,8 kWp. A continuación, se muestra una imagen de la cubierta y el emplazamiento de los paneles.



*Ilustración 16. Disposición de los paneles fotovoltaicos sobre la cubierta orientada hacia el sur [Elaboración propia con SolarEdge]*

La instalación estará compuesta por un inversor trifásico de 12 kW. El inversor para instalar será de la marca **HUAWEI** por su versatilidad y relación precio-calidad.

Por consiguiente, al superarse la potencia nominal de 10 kW será necesario la realización de un proyecto y su visado en un Colegio de Ingenieros.

Dado que la producción energética de los paneles se distribuirá según porcentajes entre todas las viviendas y los usos comunes de estas, la instalación será de autoconsumo colectivo y requerirá de una autorización previa administrativa además de los demás trámites administrativos. Gran parte del porcentaje, 70-80%, debería ser destinado al punto de suministro de la Propiedad de Vecinos con el fin de reducir costes en la bomba de calor, la iluminación común y otros equipos como el ascensor.

La instalación estará acogida a mecanismo de compensación simplificada de excedentes.

## ANEXO V. ESTUDIO DE LA INCERTIDUMBRE

A diferencia de un estudio de sensibilidad, donde se estudia que variables de entrada influyen especialmente la salida, este estudio persigue conocer la influencia que pueden producir ciertas entradas, de las que no se conoce su valor exacto, en el valor final. De esta forma, una variable con gran sensibilidad puede no ser relevante en este estudio dado que su valor de entrada es conocido con precisión.[31]

### Introducción

Los métodos para la cuantificación de la incertidumbre se pueden dividir en externos o internos. En los métodos externos, las matemáticas de la simulación no son alteradas; solo el modelo descriptivo, las condiciones iniciales, las condiciones de contorno o los métodos de resolución. Mientras que, en los métodos internos, se trata de estimar el error existente mediante métodos aritméticos. [31]

Centrándonos en los métodos externos, se dividen en locales o globales. El mayor exponente de los primeros es el análisis de sensibilidad diferencial que se basa en la realización de una simulación inicial y, posteriormente, variar individualmente los valores a estudiar entre dos valores extremos, inferior y superior, con el fin de conocer la influencia de cada parámetro individualmente. No obstante, su principal debilidad es considerar que los efectos de estas incertidumbres son independientes a los demás parámetros. Con este fin, se puede realizar un estudio factorial donde se realizan tantas simulaciones como combinaciones posibles existan con la intención de conocer las interacciones entre parámetros. [31]

En el caso de los métodos externos globales, se basan en la variación de todos los valores considerados. Tiene tres métodos principales: diferencial, factorial y Montecarlo. Los dos primeros resultan ser parejos a los de los métodos locales añadiendo la realización de varias simulaciones con el fin de obtener una muestra aceptable estadísticamente. [31]

El método de Montecarlo, además de incluir la repetición de la simulación, incluye también la distribución probabilística de cada una de las entradas de los parámetros. De esta manera, y si la probabilidad es conocida o intuida, es posible obtener valores más cercanos a la realidad. No obstante, su coste computacional es alto. [31]

Por otro lado, los métodos internos representan los parámetros como función de la incertidumbre y altera los algoritmos de la herramienta de simulación con el fin de incluir la incertidumbre en todas las etapas computacionales. Presenta como ventaja que solo requiere de una simulación para cuantificar los efectos individuales y globales. [31]

### Estudios previos

A continuación, se recogen diversos estudios de incertidumbre con conclusiones y enfoques distintos en los que se ha basado el análisis de incertidumbre posterior.

**Domínguez et al. (2010)** [32] realizaron el cálculo bajo incertidumbre de una carga punta de refrigeración de un edificio. Su aproximación, desde el método de Montecarlo, se basa en la elección de veinte variables con distribuciones estadísticas uniformes (60%) y triangulares (40%). Las variables son, principalmente, propiedades térmicas, ganancias y fracciones radiantes. Tras la elección de las variables, estas se muestrearon, a través del método del Hipercubo Latino<sup>1</sup>, y se procedió al cálculo N veces, 500.

---

<sup>1</sup> Método de muestreo aleatorio estratificado creado por Michael McKay del Laboratorio Nacional de Los Álamos en 1979

A través de la combinación de los valores muestreados de las variables, se obtuvo un conjunto de valores de carga punta de refrigeración del edificio que permitieron estudiar la media, 88,3 W/m<sup>2</sup>, y el intervalo de confianza del 100%, entre 74,3 y 102,8 W/m<sup>2</sup>. Se observa que la variación del valor medio puede alcanzar hasta un 16,4%. Por consiguiente, la incertidumbre inherente al modelo, los datos y las entradas supone un factor para tener en cuenta en la fase de diseño de los sistemas de climatización de un edificio.

El estudio estocástico realizado permite estimar el impacto de la incertidumbre en la carga punta, pero además incluye evaluar el riesgo aparejado a cada decisión de diseño en vez de basarse en simulaciones únicas.

**Koniarczyk et al. (2021)** [33] realizaron un modelo numérico en EnergyPlus de un edificio de oficinas en Polonia y estudiaron la influencia de dos casos diferentes para el cálculo de la demanda térmica y el número de horas de confort térmico: en el primero tenían en cuenta el número de personas (9-13 pers.) y la temperatura interior (22-26°C), y en el segundo tenían en cuenta la transmitancia térmica de las ventanas (0,80-1,20 W/(m<sup>2</sup>·K)) y el coeficiente de ganancia solar (0,249-0,431). En ambos casos, las distribuciones de probabilidad son normales.

Los resultados indican que los parámetros influyen en la demanda energética del edificio en un 14,51%, el caso 1, y en un 1,00%, el caso 2, y en el caso del número de horas de confort térmico en un 17,90%, el caso 1, y en un 5,07%, el caso 2. Por consiguiente, se concluye que la desviación de los parámetros de tipo “factor humano” son mucho más influyentes que los relativos a las propiedades térmicas de las ventanas.

De forma adicional, es destacable del estudio que muchos de los otros datos o variables existentes, que podrían ser considerados poseedores de incertidumbre asociada, son fijados en base a la legislación polaca, centrando la importancia y el interés del estudio en la demanda energética y en el número de horas de confort térmico en base a los cuatro parámetros citados.

**Amadeh et al. (2022)** [34] estudia la flexibilidad de la demanda de un edificio residencial de Caroline, Nueva York, Estados Unidos, en base a la incertidumbre de la climatología y de la formulación de un modelo estocástico de control predictivo formulado por ellos, comparando los resultados con un modelo determinista de control predictivo y manteniendo en todo momento el confort térmico de los ocupantes. Todos los demás datos o variables se encuentran fijados.

Las conclusiones alcanzadas son:

- El efecto de la incertidumbre proveniente de la irradiancia solar es minúsculo en comparación con la incertidumbre existe en los valores de la temperatura ambiente exterior.
- El efecto de la incertidumbre en la correcta provisión de la flexibilidad de la demanda no sigue una tendencia y depende de las condiciones climatológicas.
- Los resultados dependen de las condiciones de confort térmico de los ocupantes, incidiendo el estudio en la gran influencia del factor humano en el modelo.

## Simulaciones

Las simulaciones se han englobado en cinco grandes grupos: comportamiento y factor humano, clima, cerramientos y huecos, equipos y sus características y precio de la energía.

Dada la complejidad de los cálculos y del modelo, y su dificultad para transformarlo en ecuaciones aritméticas, se escoge el método externo local derivativo.

## Factor humano

Como se ha indicado con anterioridad, el comportamiento y el factor humano afectan enormemente a las demandas y consumos de energía de la vivienda. En **Schipper et al. (1989)**

[58], se estudió el efecto del comportamiento de los consumidores en su consumo de energía en Estados Unidos, donde se concluyó que el uso de la energía se veía influenciado por las actividades y hábitos de los consumidores en su transporte, servicios personales y en sus viviendas, ocasionando una disparidad del 45-55% entre distintos consumidores.

Por consiguiente, a lo largo de los siguientes apartados se va a desarrollar diferentes casos y condiciones que podrían ser fuentes de incertidumbre. Entre estos, caben destacar la ocupación de la vivienda, la temperatura de consigna, la eficiencia de los aparatos eléctricos y de la iluminación o la ventilación de la vivienda.

### Ocupación de la vivienda

– *Número de ocupantes permanentes*

Las viviendas cuentan con tres dormitorios con una capacidad máxima de 2 ocupantes permanentes por dormitorio. Se estudian todos los casos posibles de ocupación permanente.

Ocupación permanente [personas]	Calefacción [kWh/m <sup>2</sup> ·año]	Refrigeración [kWh/m <sup>2</sup> ·año]	Variación calefacción [%]	Variación refrigeración [%]	Variación global [%]
1	40,24	11,34	+9,35	-11,68	+3,91
2	39,09	11,84	+6,22	-7,79	+2,60
3	37,94	12,34	+3,10	-3,89	+1,29
4 [Base]	36,80	12,84	/	/	/
5	35,68	13,35	-3,04	+3,97	-1,23
6	34,57	13,87	-6,06	+8,02	-2,42

Tabla 32. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración y su variación sobre el caso base estimado con variación del número de ocupantes permanentes en las viviendas

Se observa que el aumento del número de ocupantes en la vivienda disminuye la demanda de calefacción e incrementa la demanda de refrigeración por los aportes térmicos irradiados por los ocupantes. No obstante, en el cómputo final la variación no es determinante, siendo su influencia menor de un 4%. Este resultado se produce debido a la pequeña variación de la variable, número de ocupantes permanentes, y su permanencia durante todos los días de la semana, a diferencia de un edificio de oficinas.

En esta misma dirección, **Hiller (2012)** [59], quién monitorizó los consumos en electricidad, agua y calefacción eléctrica de 57 viviendas unifamiliares en Suecia durante cuatro días de invierno, concluye que no existe una correlación clara entre el número de personas en la vivienda y la demanda de energía por unidad de superficie o el consumo de agua caliente.<sup>1</sup>

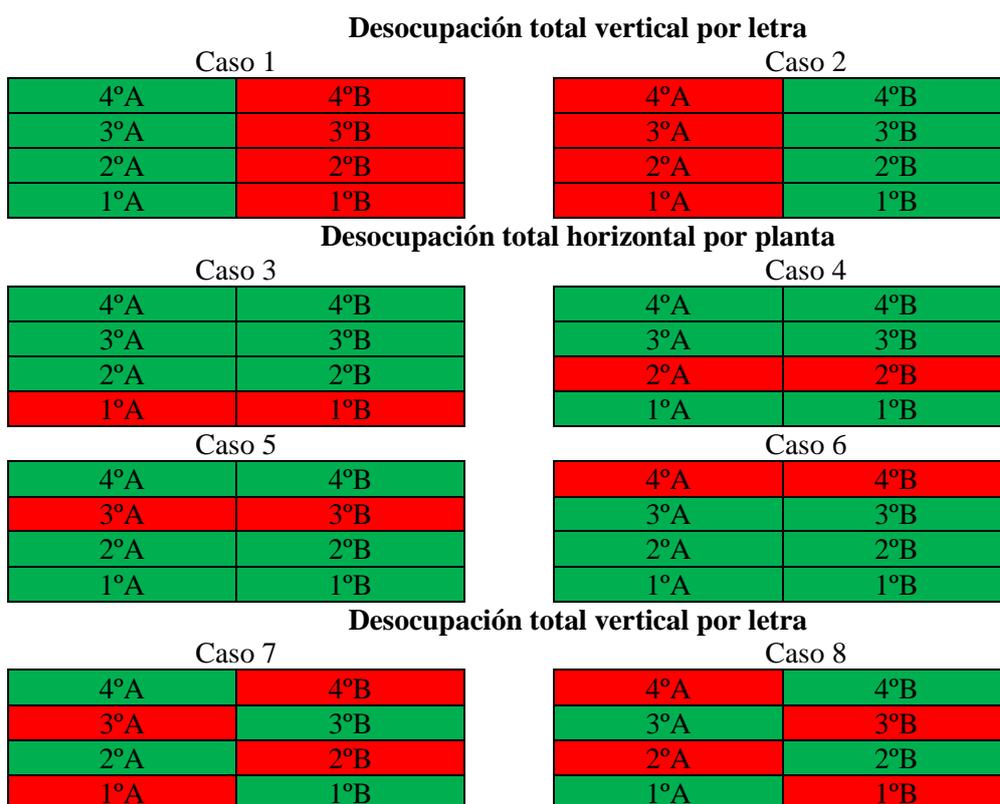
Con estos resultados, se puede concluir que la composición de la familia, número de hijos o grupo de edad no influye tampoco en las demandas de calefacción y refrigeración. No obstante, retomando el estudio de **Hiller (2012)** [59], se observa que en las viviendas con niños el consumo total de agua es superior (media, 330 l/día, vs. ≈375 l/día), pero a nivel de consumo por persona las familias compuestas por personas de la tercera edad presentan consumos más altos (media, 116 l/día, vs. ≈130 l/día).

<sup>1</sup> El número de días monitorizados podría ser demasiado reducido y, por ende, los resultados y conclusiones podrían ser fruto de un comportamiento temporal durante ese intervalo temporal en vez de un comportamiento permanente.

– Desocupación de las viviendas

En el **Censo de 2011** [35] del **Instituto Nacional de Estadística (INE)**, se recoge que del total de viviendas en España (25.208.623) 3.443.365 viviendas se encuentran vacías, suponiendo el 13,66% del total. En el caso de Zaragoza, este porcentaje se reduce al 10,7 %. Por consiguiente, la influencia de la desocupación de las viviendas, ya sea permanente o parcial, constituye una incertidumbre en las demandas de calefacción y refrigeración de los edificios.

A lo largo de los siguientes estudios, se va a estudiar la influencia de la desocupación permanente de las viviendas en las demandas de calefacción y refrigeración del edificio. Se realizan diversos estudios con diferentes configuraciones de desocupación total de las viviendas, tanto vertical, horizontal y mixta.



*Ilustración 17. Casos de desocupación permanente de viviendas*

En la Ilustración 17 se representa la ocupación de la vivienda con el color verde, mientras que la desocupación se representa con el color rojo.

<b>Desocupación total vertical por letra</b>					
<b>Viviendas ocupadas</b>	<b>Calefacción [kWh/m<sup>2</sup>·año]</b>	<b>Refrigeración [kWh/m<sup>2</sup>·año]</b>	<b>Variación calefacción [%]</b>	<b>Variación refrigeración [%]</b>	<b>Variación global [%]</b>
<b>Letra A</b>	47,51	12,22	+29,10	+4,83	+20,33
<b>Letra B</b>	45,11	13,68	+22,58	+6,54	+18,43

*Tabla 33. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración ante la desocupación vertical de las viviendas*

<b>Desocupación total horizontal por planta</b>					
<b>Viviendas desocupadas</b>	<b>Calefacción [kWh/m<sup>2</sup>·año]</b>	<b>Refrigeración [kWh/m<sup>2</sup>·año]</b>	<b>Variación calefacción [%]</b>	<b>Variación refrigeración [%]</b>	<b>Variación global [%]</b>
<b>1º planta</b>	38,16	14,05	+3,70	+9,42	+5,18
<b>2º planta</b>	45,76	13,90	+24,35	+8,26	+20,19
<b>3º planta</b>	45,85	13,82	+24,59	+7,63	+20,21
<b>4º planta</b>	41,73	13,89	+13,40	+8,18	+12,05

*Tabla 34. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración ante la desocupación horizontal de las viviendas*

<b>Desocupación total mixta en zigzag</b>					
<b>Viviendas ocupadas</b>	<b>Calefacción [kWh/m<sup>2</sup>·año]</b>	<b>Refrigeración [kWh/m<sup>2</sup>·año]</b>	<b>Variación calefacción [%]</b>	<b>Variación refrigeración [%]</b>	<b>Variación global [%]</b>
<b>1ºA 2ºB 3ºA 4ºB</b>	58,00	14,82	+57,61	+15,42	+46,70
<b>1ºB 2ºA 3ºB 4ºA</b>	55,74	15,83	+51,47	+23,29	+44,18

*Tabla 35. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración ante la desocupación mixta o zigzag de las viviendas*

Como es esperable, la desocupación de algunas de las viviendas repercute en un aumento de las demandas tanto de calefacción como de refrigeración por metro cuadrado. Destaca en la desocupación horizontal que las demandas aumentan más considerablemente en el caso de la desocupación de las plantas intermedias, dado que los pisos 1º o 4º se ven sin recintos calefactados tanto en el suelo como en el techo. Por esta misma razón, se observa un aumento mucho más destacable en la configuración mixta frente a la vertical por encontrarse todas las viviendas con recintos no calefactados a su alrededor, aunque las viviendas desocupadas sean las mismas (4).

#### Temperatura de consigna

Se consulta el Instituto Nacional de Estadística (INE), donde se encuentra la “**Encuesta de Hogares y Medio Ambiente**” [36] del año **2008** donde se indica que la temperatura media del termostato de la calefacción durante el día es de **21,3°C** y la de refrigeración de **22,3°C**. Los tipos de viviendas y sus configuraciones ocupacionales encuestados son muy variados: Hogar unipersonal, pareja sola, pareja con hijos, padre o madre solo con algún hijo y otro tipo de hogar; siendo la desviación del valor medio de 0,1°C tanto en calefacción como en refrigeración.

Por otro lado, la misma encuesta indica que un **48,7%** disponen de un termostato y un **35,5%** disponen de aire acondicionado.

Por consiguiente, los valores contradicen lo indicado el Documento Básico HE Ahorro de Energía y suponen una desviación de 1,3°C (calefacción) y 3,7°C (refrigeración) de la temperatura media del citado documento.

Se procede a estudiar la influencia de la temperatura de consigna en las demandas de calefacción y refrigeración. Igualmente, se estudia el efecto del apagado de la calefacción central y/o del aire acondicionado durante la noche.

– *Modificación del termostato*

Se proceden a hacer tres simulaciones con la temperatura de consigna media de la encuesta (21°C), con un grado Celsius superior a la media y con un grado Celsius inferior al caso base. Las temperaturas de consigna indicadas se dan únicamente en las horas diurnas. En las horas nocturnas la temperatura de consigna es de 17°C en base a lo indicado en el Código Técnico de la Edificación.

<b>Temperatura de consigna</b> [°C]	<b>Demanda de calefacción</b> [kWh/m <sup>2</sup> ·año]	<b>Variación</b> [%]
<b>19</b>	30,65	-16,71
<b>20</b> [Base]	36,80	/
<b>21</b>	43,65	+18,61
<b>22</b>	50,78	+37,99

*Tabla 36. Demandas térmicas anuales de los valores de temperatura de consigna de calefacción ante la variación sobre el caso base*

De forma pareja, se realiza el mismo estudio en la temperatura de consigna de la refrigeración, siendo el número de simulaciones superior al encontrarse la temperatura de consigna del CTE y la de la encuesta (22°C) más distanciadas. Las temperaturas de consigna indicadas se dan únicamente en las horas diurnas durante las cuales el aire acondicionado está en funcionamiento. En las horas nocturnas la temperatura de consigna es de 27°C en base a lo indicado en el Código Técnico de la Edificación.

<b>Temperatura de consigna</b> [°C]	<b>Demanda de refrigeración</b> [kWh/m <sup>2</sup> ·año]	<b>Variación</b> [%]
<b>26</b>	9,81	-23,60
<b>25</b> [Base]	12,84	/
<b>24</b>	16,24	+26,48
<b>23</b>	19,84	+54,52
<b>22</b>	23,62	+83,96
<b>21</b>	27,51	+114,25

*Tabla 37. Demandas térmicas anuales de los valores de temperatura de consigna de refrigeración ante la variación sobre el caso base*

Se observa que la influencia de la temperatura de consigna es muy importante y es un dato que presenta gran incertidumbre dado que los ocupantes pueden variar su valor tanto a lo largo del día como de un año a otro. Además, la propia incertidumbre de medición y de sensibilidad del termostato pueden introducir incertidumbre asociada.

– *Caldera apagada durante las noches*

En algunas comunidades de propietarios con calderas comunitarias, estas son apagadas por la noche. Otra posibilidad, sería que los propietarios apagaran, indicando en el termostato una temperatura de consigna muy baja. Los resultados obtenidos muestran la demanda de calefacción global del edificio al aplicar estas medidas y su variación respecto de las demandas anteriormente estimadas con diferentes temperaturas de consigna.

<b>Temperatura de consigna</b> [°C]	<b>Demanda de calefacción</b> [kWh/m <sup>2</sup> ·año]	<b>Variación</b> [%]
<b>19</b>	26,92	-12,17
<b>20</b> [Base]	33,05	-10,19
<b>21</b>	39,50	-9,51
<b>22</b>	46,31	-8,80

Tabla 38. Demandas térmicas de los valores de temperatura de consigna de calefacción ante el apagado de la calefacción durante la noche

– *Sistemas de refrigeración apagados durante las noches*

Su efecto es nulo porque gracias a la ventilación nocturna no se excede la temperatura de consigna de 27°C.

Eficiencia de la iluminación

En base a lo indicado en la Tabla 23 y la Tabla 24 del ANEXO II, relativas a la eficiencia de los diferentes tipos de bombilla y sus fracciones radiantes y convectivas, se estudia la influencia de los diferentes tipos de bombillas en las demandas térmicas del edificio. Para la comparativa, se toman como valores extremos el tipo de bombilla con menor eficiencia, halógena, y el de mayor eficiencia actual, LED. Los aportes térmicos se estiman en base a una iluminancia,  $l_m$ , constante para todos los casos, 150  $l_m$ .

<b>Iluminación</b> [W/m <sup>2</sup> ]	<b>Calefacción</b> [kWh/m <sup>2</sup> ·año]	<b>Refrigeración</b> [kWh/m <sup>2</sup> ·año]	<b>Variación calefacción</b> [%]	<b>Variación refrigeración</b> [%]	<b>Variación global</b> [%]
<b>Halógenas</b> [9,50]	30,29	16,14	-17,69	+25,70	-6,47
<b>Mezcla</b> [Base]	28,26	13,67	/	/	/
<b>LEDs</b> [2,20]	39,96	11,37	+8,59	-11,45	+3,40

Tabla 39. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración y su variación sobre el caso base estimado con variación del tipo de iluminación y su eficiencia energética

Se observa que las bombillas con mayor eficiencia aumentan la demanda de calefacción, pero reduce la de refrigeración. No obstante, en el cómputo global la influencia de la iluminación no es relevante siendo inferior al 7% de variación. Por otro lado, aunque las bombillas de menor eficiencia presentan una demanda global menor que las del caso base, cabe incidir en que el consumo de electricidad es más de dos veces superior.

Eficiencia de los aparatos eléctricos

Como se indica en el ANEXO I, los aparatos eléctricos se categorizan en referencia con su eficiencia energética según una escala de la “A” a la “G”, siendo los que poseen la “A” los más eficientes.

A través de las siguientes simulaciones, se busca conocer la influencia de la eficiencia de los equipos en las demandas de calefacción y refrigeración y en el consumo eléctrico de la vivienda. Para ello, se va a segmentar la escala en tres grupos: alta eficiencia (A, B y C), media eficiencia (D y E) y baja eficiencia (F y G). Dado que cada electrodoméstico o equipo tiene la escala

energética reglamentada<sup>1</sup> con diferentes parámetros se va a considerar que la variación en potencia emitida es del  $\pm 50\%$  de la potencia del caso base.

Aparatos [W/m <sup>2</sup> ]	Calefacción [kWh/m <sup>2</sup> ·año]	Refrigeración [kWh/m <sup>2</sup> ·año]	Variación calefacción [%]	Variación refrigeración [%]	Variación global [%]
<b>2,20</b> [Alta]	39,07	11,80	+6,17	-8,10	+2,48
<b>4,40</b> [Media]	36,80	12,84	/	/	/
<b>6,60</b> [Baja]	34,17	13,91	-7,15	+8,33	-3,14

Tabla 40. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración y su variación sobre el caso base estimado con variación de la eficiencia energética de los aparatos de las viviendas

Se observa que los aparatos eléctricos menos eficientes favorecen una menor demanda global de la vivienda. Además, se observa que su influencia como lo era el número de ocupantes no es de gran relevancia a nivel de cargas térmicas. No obstante, los aparatos con eficiencias energéticas bajas tienen un consumo eléctrico asociado un 50% superior a los de media eficiencia y un 200% que los aparatos más eficientes.

### Ventilación

El caudal de ventilación a través de las ventanas, cuando estas se abren para renovar el aire, es variable dependiendo de factores climáticos como el viento o la diferencia de temperatura. A través de una variación de un  $\pm 50\%$  de sobre el valor nominal, se estudia la influencia de esta variable en las demandas de calefacción y refrigeración.

Ventilación [renovación/h]	Calefacción [kWh/m <sup>2</sup> ·año]	Refrigeración [kWh/m <sup>2</sup> ·año]	Variación calefacción [%]	Variación refrigeración [%]	Variación global [%]
<b>0,5</b>	33,78	14,56	-8,21	+13,40	-2,62
<b>1</b>	36,80	12,84	/	/	/
<b>1,5</b>	39,98	11,45	+8,64	-10,83	+3,61

Tabla 41. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración y su variación sobre el caso base estimado con variación del caudal de ventilación de las viviendas

Se observa que la influencia de la ventilación es bastante reducida en el cómputo final. Por consiguiente, la incertidumbre estimada puede descartarse.

### Otros

#### – Aspectos psicológicos y sociológicos

En **Socolow et al. (1978)** [60] compararon los consumos durante 5 años de nueve viviendas idénticas, con tres dormitorios y misma planta, sistema de calefacción (gas) y refrigeración (electricidad), y electrodomésticos, en la ciudad de Twin Rivers, Nueva Jersey. El estudio se desarrolló para conocer la razón de los consumos dispares en cuestión de gas y electricidad entre las viviendas. Con el fin de conocer la influencia de los ocupantes en los consumos, se estudió el efecto de informar a estos de sus consumos diarios, produciéndose una reducción de los consumos de electricidad estivales de entre el 15% y el 20% y los consumos de gas invernales en un 10%.

<sup>1</sup> Lavavajillas, lavadoras, lavasecadoras, frigoríficos, pantallas y monitores, lámparas, bombillas, sistemas de refrigeración y secadoras

– *Ingresos medios en la vivienda*

Ya en 1989 el estudio de **Schipper et al.** [58], donde se compararon los consumos de “varios miles” de familias suecas que vivían en casas virtualmente idénticas en 1977, demostró que los ingresos domésticos no influían en el consumo eléctrico total de la vivienda.

A nivel nacional, en **Zarco-Soto et al. (2021)** [61] se estudió la influencia del salario medio en la vivienda en los consumos de electricidad y gas natural anuales y sus emisiones aparejadas. A través de la categorización de las 145 ciudades con población superior a 50.000 habitantes de España en cinco grupos según horquillas de los salarios medios en función del número de Salarios Mínimos Profesionales (SMI).

Los resultados obtenidos demuestran que a mayores ingresos el consumo de electricidad se mantiene constante, mientras que el del gas natural se incrementa sustancialmente, siendo la diferencia entre el grupo 1 (menores ingresos) y el grupo 5 (mayores ingresos) de un 900%. Sin embargo, es destacable que los grupos con ingresos inferiores, 1 y 2; que representan el 78% de las ciudades y el 62% de la población estudiada; presentan un muestreo variado geográfica y climáticamente, frente a los grupos superiores, 4 y 5, quienes representan el 9% de las ciudades y el 25% de la población estudiada y se encuentran geográficamente limitados a la Comunidad de Madrid, Cataluña y País Vasco.

Por consiguiente, se puede concluir que el consumo de la electricidad no se encuentra condicionado por los ingresos de la vivienda, mientras que la variación del consumo de gas natural podría encontrarse influenciado por los ingresos de la vivienda, la climatología, la tipología de la vivienda, apartamentos o unifamiliares, una interacción entre varios parámetros u otros factores no contemplados.

– *Nivel educativo*

En **Wang et al. (2020)** [62] se comparó el efecto del nivel de educación y la desigualdad de esta en el consumo de energía en la provincia de Cantón (China), dividiéndola en dos zonas geográficas: delta del río de las Perlas (zona urbana) y no delta del río de las Perlas (zona rural).

Se concluye que la calidad de la educación entre la población promueve el aumento del consumo de energía, mientras que la escala de desarrollo educacional (por ejemplo, el número de universidades o el gasto gubernamental en educación) lo reduce. Es destacable que, en las regiones rurales, la influencia de la mejora del nivel y calidad educativos es alta, incrementando el consumo de energía, mientras que, en las regiones urbanas, el desarrollo no produce incremento alguno.

Finalmente, destacan que el nivel educativo no afecta directamente al consumo energético, sino a través de factores indirectos como el nivel de ingresos, la producción, el consumo o el capital humano lo hacen.

– *Sexo*

**Grünewald et al. (2020)** [63] estudiaron el número de usos de energía, consumo de electricidad y consumo durante las horas pico (17:00-19:00) de 471 viviendas de Reino Unido por hombres y por mujeres. Entre los resultados, se obtiene que las mujeres realizan más usos eléctricos, pero de menor potencia y consumo. Destacan entre las mujeres los usos eléctricos de gran envergadura de la radio, lavado y vestirse, y preparar comida fría, mientras que en el caso de los hombres estos usos son la televisión, leer, tentempiés, cuidado personal y microondas.

Adicionalmente, en viviendas individuales el consumo eléctrico de las habitadas por los hombres es de media un 13% superior que las habitadas por mujeres. En el caso de las horas pico, los hombres vuelven a consumir más, un 5%, que las mujeres.

– *Transporte eléctrico*

Los propietarios o compradores de un nuevo vehículo se enfrentan a los siguientes factores.

A nivel estadístico:

- Según la “**Encuesta de Hogares y Medio Ambiente**” de 2008 [36] del **Instituto Nacional de Estadística (INE)**, 74,7% de las viviendas disponen de al menos un vehículo. El **Banco de España** en 2020 realiza “**Encuesta financiera de las familias (EFF) 2020: métodos, resultados y cambios desde 2017**” [64], indicando que en 2017 el 75,5% de las familias disponían de un vehículo frente a 2020 donde lo era el 77,1%.
- En el “**Informe Anual de 2021**” [65] de la **Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC)**, se constata que la edad media del parque móvil es de 13,49 años, frente a la media europea de 11,5 años. Además, un 63,6% de los turismos tienen más de 10 años.
- En el “**Informe Anual de 2021**” [65] de la **Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC)**, se indica que las matriculaciones de vehículos alternativos aumentaron en un 55,2% en comparación con 2020 y se alcanzó un 30% de la cuota total de mercado en 2021.
- Según la **Unión Española de Entidades Aseguradoras y Reaseguradoras (UNESPA)** en su estudio de 2020 [66], de los 32 millones de vehículos que hay en España, 24,6 millones son turismos. Los coches se dividen, según el tipo de motor, en diésel (14,9 millones), gasolina (9 millones) y otras motorizaciones (674.017). Este último grupo se compone casi en su totalidad por híbridos y eléctricos. Por consiguiente, solamente un 2,7% del parque móvil de turismos posee motores sin emisiones.

A nivel legislativo:

- La **Ley de Cambio Climático y Transición Energética, Ley 7/2021**, estipula la prohibición de coches de combustión interna en España a partir de 2040. La fecha se adelantará por la decisión del Parlamento Europeo y la Comisión Europea de vetar las ventas a partir de 2035 en la Unión Europea. [67]
- La **Ley 7/2021**, insta a los municipios españoles de más de 50.000 habitantes (149 municipios) o mayores de 20.000 habitantes con problemas de calidad del aire a desarrollar una zona de bajas emisiones (ZBE) antes de 2023. Actualmente, las ZBE de las áreas metropolitanas de Madrid y Barcelona solo, con excepciones, permiten la entrada a vehículos con etiquetas cero (eléctricos, híbridos enchufables y pilas de hidrógeno) o ECO (híbridos y propulsados por gas natural o GLP).
- El **Programa Moves III**, en vigor desde 14 de abril de 2021<sup>1</sup>, incentiva la adquisición de vehículos eléctricos enchufables y de pila de combustible de categorías M1 (turismos), N1 (furgonetas), L3e, L4e, L5e (motocicletas eléctricas) y L6e, L7e (cuadriciclos eléctricos) y la implantación de infraestructura de recarga de vehículos eléctricos. [68]
- En la **Decisión (PESC) 2022/884 del Consejo**, se prohíbe “comprar, importar o transferir, directa o indirectamente, petróleo crudo o productos petrolíferos si son originarios de Rusia o se exportan desde Rusia” y “facilitar, directa o indirectamente, asistencia técnica, servicios de intermediación, financiación o asistencia financiera o cualesquiera otros servicios” a la primera de las prohibiciones a partir del 5 de diciembre de 2022. Además, la **Decisión (PESC) 2022/2369 del Consejo** amplía el embargo con un precio máximo por barril de 60 USD (\$).

---

<sup>1</sup> Real Decreto 266/2021

- Actualmente, y como se ha comentado en el ANEXO I, la Comisión Europea y el Parlamento Europeo están debatiendo el “**Objetivo 55**” que afectará al sector del transporte por carretera al incluir estas emisiones en el mecanismo de comercio de derechos de emisión de la Unión Europea. [49]

A nivel del mercado petrolífero:

- Aumento del precio del petróleo crudo de la cesta de referencia de la **OPEP** (Organización de Países Exportadores de Petróleo) en un 59,69% de 2021 a 2022<sup>1</sup>. [69]

Por todas estas razones, la compra de un coche eléctrico es cada vez más habitual. El documento titulado “**Justificación del consumo anual de energía igual o superior al 80% de la energía generada por la instalación**” [70] realizado por el **Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)** para la estimación de consumos a futuro para la justificación del 80% de la energía generada por una instalación de autoconsumo estipula que una estimación de consumo energético a futuro por unidad de vehículo eléctrico en la vivienda es de 1630 kWh.

## **Clima**

Los datos climáticos empleados por CYPETHERM HE Plus son obtenidos de los ficheros de datos climáticos realizados por parte de **Rafael Villar Burke** y **Daniel Jiménez González** del **Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)** en 2015 [11] en base a valores predefinidos como la zonificación climática, detallada en el *Documento de Apoyo al Documento Básico DB-HE Ahorro de energía DA DB-HE/1* titulado “**Zonificación climática en función de la radiación solar global media diaria anual**”[71], y la zona de invierno y verano definida por altitud y provincia dispuestas en la *Tabla a-Anejo B* del Anejo B del **Documento Básico DB-HE Ahorro de energía** [16].

No obstante, los datos son estáticos y pueden presentar variaciones de un año a otro debido a comportamientos climáticos cíclicos o no, eventos medioambientales o la acción del hombre en el actual transcurso del calentamiento climático.

Esta última influencia se encuentra recogida en el estudio “**El clima del término municipal de Zaragoza en el contexto del cambio global**” realizado por **Cuadrat et al. (2014)** [40]. A través del estudio de la temperatura media, máxima media y mínima media de Zaragoza a lo largo de los meses y el año, y recuperando las series históricas de las estaciones meteorológicas de Zaragoza, se observa un incremento paulatino de las temperaturas en los últimos 20 años [Ilustración 18].

---

<sup>1</sup> Media realizada hasta septiembre de 2022

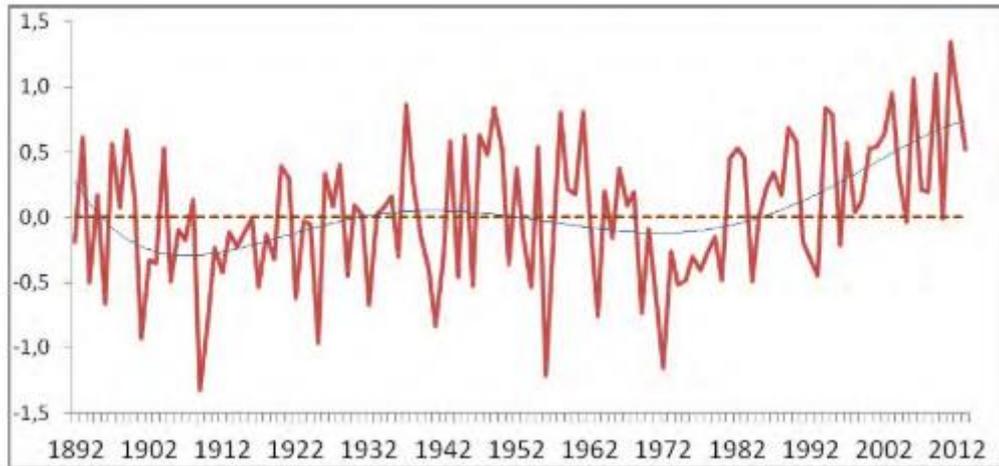


Ilustración 18. Evolución de la temperatura media anual de Zaragoza desde 1892, en color rojo, y media móvil de once años, en color negro [40]

Algunas de los datos que se recogen son los siguientes:

- Aumento de la temperatura media de  $0,07^{\circ}\text{C}/\text{década}$  y un incremento global desde que se tiene registros de  $1,6^{\circ}\text{C}$ .
- Aumento de las noches tropicales, noches donde la temperatura es superior a  $20^{\circ}\text{C}$ , de 89 en el período 1910-1930 a 386 en el período 1991-2010.
- Disminución de los días con temperaturas inferiores a  $0^{\circ}\text{C}$  de 16 entre 1910-1930 a 13 entre 1991-2010.

Por consiguiente, se concluye que se producirá una disminución de la demanda de energía para calefacción, un aumento de la demanda de refrigeración y la disminución de la calidad de las ciudades.

Por esta razón, se profundiza en los ficheros de datos meteorológicos. Se encuentra la página web **Climate.OneBuilding** [38] que contiene datos meteorológicos de más de 16.000 localizaciones, 4 de ellas de Zaragoza. La mayoría de los ficheros están compuestos por datos meteorológicos horarios del ISD (Integrated Surface Database) perteneciente a la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica del Departamento de Comercio de Estados Unidos según las metodologías de ISO 15927-4:2005. Destacan entre estas, las que recogen la media de datos climáticos de los períodos de 1958-2021, 2004-2018 y 2007-2021 cuyos datos son descargados e insertados en el programa con el fin de observar la divergencia entre los diferentes ficheros con el fichero incluido en CYPETHERM HE Plus.

Caso	Calefacción [kWh/m <sup>2</sup> ·año]	Refrigeración [kWh/m <sup>2</sup> ·año]	Variación calefacción [%]	Variación refrigeración [%]	Variación global [%]
<b>1958-2021</b>	24,46	10,98	-33,53	-14,49	-28,61
<b>2004-2018</b>	24,23	13,88	-34,16	+8,10	-23,23
<b>2007-2021</b>	20,67	13,74	-43,83	+7,01	-30,68

Tabla 42. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración y su variación sobre el caso base estimado con los dos ficheros de datos meteorológicos descargados

Se observa que las demandas de calefacción y refrigeración con la serie más contemporánea difiere sustancialmente, con gran dispersión en el caso de la demanda de calefacción, de las estimadas con los datos climáticos descritos anteriormente. Por consiguiente, se constata que la

divergencia entre los datos climáticos existentes y los recogidos de una estación meteorológica es relevante.

Además, se observa una disminución de la demanda de calefacción, mientras que la demanda de refrigeración aumenta según las series se acercan más al presente. Por consiguiente, queda probado el efecto del calentamiento global en las demandas de calefacción y refrigeración, fenómeno que quizás no se esté teniendo en cuenta en los programas de simulación o en el propio Código Técnico de la Edificación.

Por otro lado, es importante preguntarse si los datos incluidos y, posteriormente, introducidos en el modelo climático se ajustan a la realidad o no. En **Cuadrat et al. (2014)** [40], se detalla la existencia de 14 observatorios meteorológicos en Zaragoza desde 1885, de los cuales solo 7 se encontraban en activo a fecha del estudio. No obstante, la longitud de los registros es muy dispar, y además están afectadas con frecuencia por circunstancias ajenas al comportamiento del clima, como variaciones de emplazamiento, cambios de instrumentación, alteración del entorno de los observatorios, etc. En el caso de las mediciones incluidas en el ISD, son las referentes a las obtenidas en la estación meteorológica ubicada en el aeropuerto de Zaragoza.

Ante esta información, surge la pregunta de la influencia del río Ebro en las temperaturas de zonas más cercanas a este, en contraposición a la estación meteorológica tomada.

## Cerramientos y huecos

### Variación de la transmitancia térmica de las ventanas y lucernarios

Como se ha indicado anteriormente, el valor de la transmitancia térmica de un marco metálico con RPT puede oscilar entre los 4,00 y los 2,50 W/m<sup>2</sup>·K, mientras que en el caso del vidrio este valor oscila entre los 3,30 y los 2,70 W/m<sup>2</sup>·K.

Con el fin de conocer la influencia de las propiedades térmicas de las viviendas, se va a estudiar la influencia de los casos límite superior, 3,50 W/m<sup>2</sup>·K, e inferior, 2,60 W/m<sup>2</sup>·K, de los anteriores valores citados. Además, se va a estudiar la posibilidad de que el marco metálico no posea la capacidad de rotura de puente térmico, 3,80 W/m<sup>2</sup>·K.

U [W/m <sup>2</sup> ·K]	Calefacción [kWh/m <sup>2</sup> ·año]	Refrigeración [kWh/m <sup>2</sup> ·año]	Variación calefacción [%]	Variación refrigeración [%]	Variación global [%]
<b>3,50</b>	39,48	12,62	+7,28	-1,71	+4,96
<b>2,60</b>	33,29	13,2	-9,54	+2,80	-6,35
<b>3,80</b>	41,26	12,55	+12,12	-2,26	+8,40

*Tabla 43. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración y su variación sobre el caso base ante la variación de la transmitancia térmica de los cerramientos acristalados*

Se observa una influencia fuerte en la demanda de calefacción, mientras que en las demandas de refrigeración la desviación es mucho más reducida. No obstante, la medición de estos valores resulta compleja y, por consiguiente, es una incertidumbre para tener en cuenta, aunque su influencia sea moderada en el cómputo final.

### Variación del factor solar de los vidrios de las ventanas y lucernarios

De forma pareja, se estudia la influencia del factor solar de los vidrios en las demandas de calefacción y refrigeración en la vivienda con un caso con un valor alto, 0,99, y con un caso con un valor bajo, 0,5.

<b>Factor solar</b>	<b>Calefacción [kWh/m<sup>2</sup>·año]</b>	<b>Refrigeración [kWh/m<sup>2</sup>·año]</b>	<b>Variación calefacción [%]</b>	<b>Variación refrigeración [%]</b>	<b>Variación global [%]</b>
<b>0,99</b>	29,90	15,39	-18,75	+19,86	-8,76
<b>0,5</b>	45,41	9,82	+23,40	-23,52	+11,26

Tabla 44. Demandas térmicas anuales de calefacción y refrigeración y su variación sobre el caso base ante la variación del factor solar de los cerramientos acristalados

Se observa que el factor solar, traducido al porcentaje de energía que atraviesa el vidrio de la venta, es un valor para tener en cuenta. Se constata que un mayor factor solar, como es lógico, reduce la demanda de calefacción, pero aumenta la de refrigeración. No obstante, en el cómputo total se observa que reduce la demanda global en casi un 9%. Por consiguiente, se concluye que la opacidad, color o cualquier característica de los vidrios que reduzca el factor solar, menoscaba la eficiencia energética de la vivienda.

## Precio de la energía

El precio de venta de la electricidad y del gas natural están influenciados y afectados tanto por el desarrollo y variabilidad del mercado como por la propia legislación nacional y comunitaria, quién regula el mercado y grava los productos.

### Electricidad

En la actualidad, el precio de la electricidad es indicado por el Operador del Mercado Ibérico de Energía (OMIE) quien casa la demanda con la oferta a un precio de mercado o “precio marginal” marcado por la última central eléctrica en lanzar su oferta en el proceso de subasta. Por consiguiente, las energías más baratas; renovables, carbón y nuclear; son las primeras en entrar y las más caras; gas y tecnologías mixtas; las últimas, marcando el precio final de la electricidad.

Debido a esta mecánica, existen dos tarifas a las que uno se puede acoger como consumidor:

- *Tarifa del mercado regulado o PVPC*: el precio del kWh oscila cada día y cada hora en función de los precios marcados. Solo es contratable para potencias inferiores a 10 kW.
- *Tarifas de mercado libre*: ofertadas por las comercializadoras y, habitualmente, con precios menos variables que en la tarifa regulada.

Por otro lado, la electricidad está sujeta a diversos impuestos detallados, a continuación, de forma decreciente

- *Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA)*: grava el total de la energía, potencia contratada y el impuesto eléctrico al 21%. Desde el 26 de junio de 2021, se redujo al 10%. Posteriormente y desde el 1 de junio de 2022 hasta el 31 de diciembre de 2022, su gravamen se ha reducido al 5%.
- *Impuesto sobre el valor de la producción de energía eléctrica*: gravado con un 7%. Suspendido desde el 14 de septiembre de 2021.
- *Impuesto sobre la electricidad*: impuesto especial, creado para el uso responsable de los recursos y para sufragar las subvenciones relacionadas con la minería del carbón, que grava un 5,11269632% el total de la energía y potencia consumida. Reducido al 0,5% desde el 14 de septiembre de 2021.
- Otros impuestos que afectan al precio de la venta de las centrales eléctricas:
  - Impuesto sobre el carbón
  - Impuesto sobre el almacenamiento de combustible nuclear gastado y residuos radiactivos en instalaciones centralizadas

- Impuesto sobre la producción de combustible nuclear gastado y residuos radiactivos resultantes de la generación de energía nucleoelectrónica

A continuación, se puede observar el precio de la electricidad a lo largo de la serie desde junio de 2021 a septiembre de 2022.

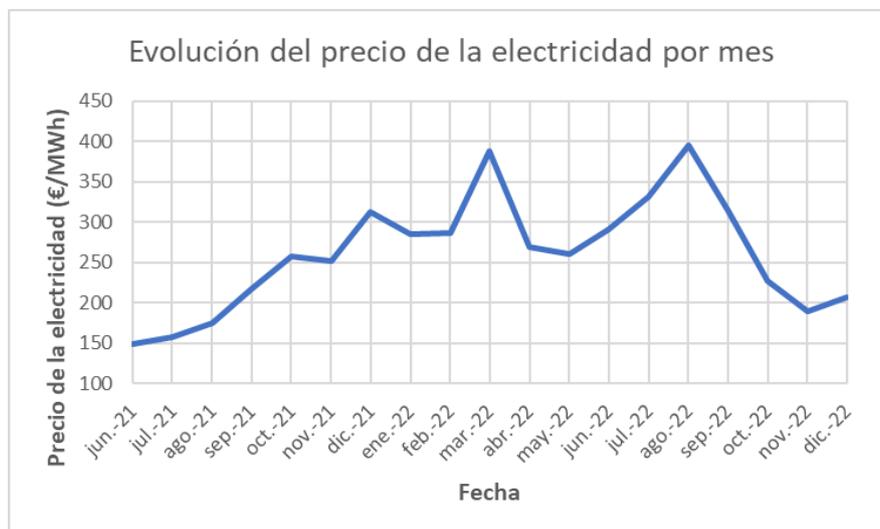


Ilustración 19. Evolución del precio de la electricidad en los últimos 16 meses [Elaboración propia con los datos del Sistema de Información del Operador del Sistema (e-sios) de la Red Eléctrica de España]

Como se puede observar, desde junio de 2021, el precio de la electricidad ha aumentado considerablemente, destacando los picos alcanzados en marzo y agosto de 2022, coincidiendo, respectivamente, con el inicio de la invasión rusa de Ucrania y las sanciones impuestas al gas natural ruso.

### Gas natural

La demanda del gas natural está creciendo rápidamente, pero de forma disparada entre las diferentes regiones del mundo y liderando el crecimiento Asia. Algunas de las razones para este crecimiento de la demanda en Asia se deben a su gran población, la mejora de las condiciones económicas y de vida, las nuevas restricciones respecto a la emisión de gases de efecto invernadero, y la apuesta de los países en vía de desarrollo incluyendo en sus mixes de producción energética el gas natural e instalando calderas de gas en las viviendas.

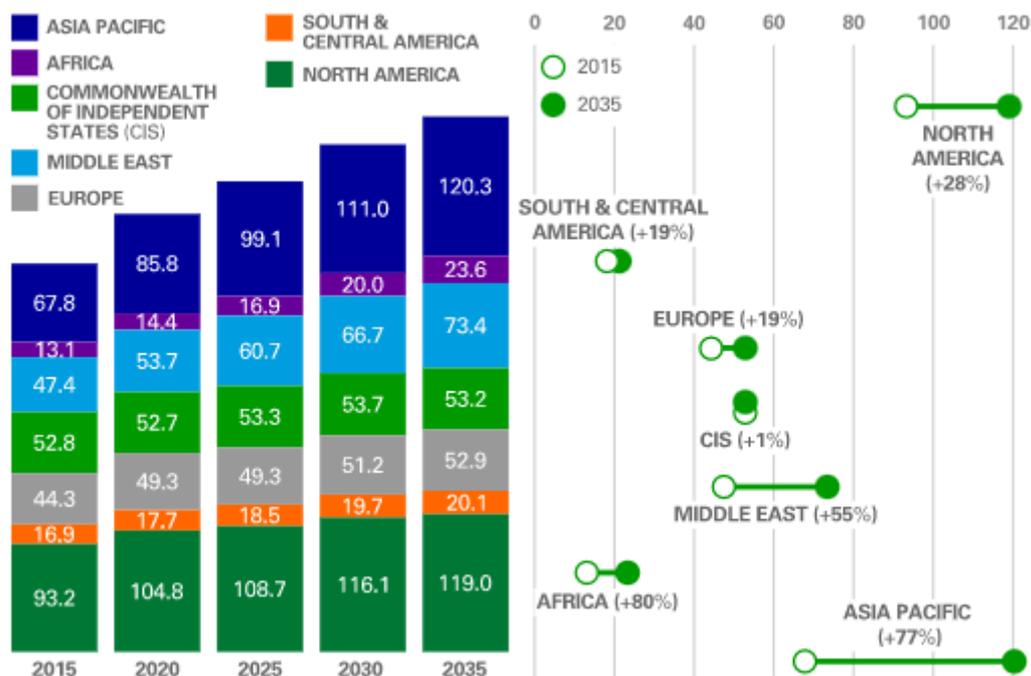


Ilustración 20. Demandas de gas natural por región y su crecimiento respecto de la demanda de 2015 [72]

Además, se espera alcanzar el pico de demanda en 2037 y se estima que el mercado se desplazará hacia el sur y sureste de Asia ante la reducción en la demanda del gas en Norteamérica, Europa y Japón en la producción energética. [73]

España no es un gran productor de gas natural, 1,502 GWh lo que supone el 0,38% del gas natural consumido anualmente [74], y, por lo tanto, debe ser importado del exterior. Del total importado, el 58% del gas entra por gasoducto y el 42% restante mediante buques “metaneros” en forma de gas natural licuado (GNL)[42].

Por esta razón, España es el país de la Unión Europea con mayor número de plantas regasificadoras, seis, y posee una capacidad de almacenamiento de gas natural licuado y regasificación del 38% y del 32% del total comunitario, respectivamente. [43]

Retomando la cuestión de la importación del gas natural, este último año desde enero a septiembre los tres países de los que se ha importado más han sido Estados Unidos (31%), Argelia (25%) y Nigeria (14%), siendo el resto importado de otros 15 países. Por otro lado, el aprovisionamiento por buque ha aumentado hasta el 72%. [75]

En 2021 las aportaciones de los anteriores países eran muy diferentes, Estados Unidos (14,2%), Argelia (42,7%) y Nigeria (11,4%) [76]. Esta variación respecto de 2021 se sustenta en las diversas y recientes crisis diplomáticas con Argelia y Rusia que han llevado a convertirnos en puerto de entrada para el gas natural de Europa Central y la venta del gas natural de Estados Unidos a Europa en detrimento del gas ruso.

En cuanto al precio en el mercado mayorista, el **Banco de España** en su último **Boletín Económico** de marzo de 2022 [44] incluye esta gráfica de la evolución del precio del gas natural en el mercado europeo y estadounidense y queda patente la diferencia entre productores y consumidores.

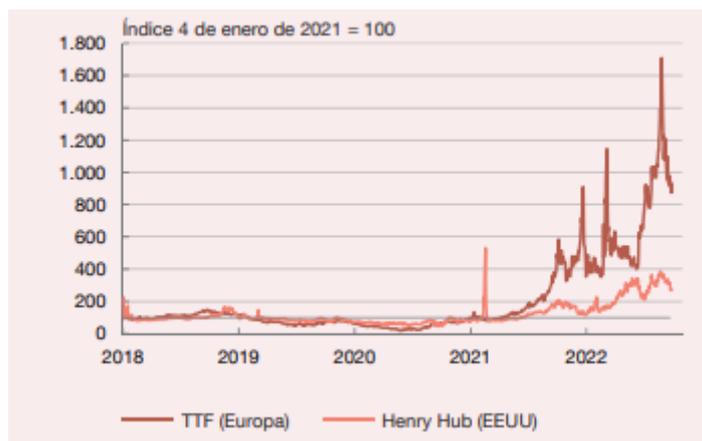


Ilustración 21. Evolución del precio del gas natural respecto al índice del 4 de enero de 2021 [44]

Otra gráfica de gran interés es la relativa a los posibles escenarios del precio del gas natural en España en los próximos dos años, 2023-2024.

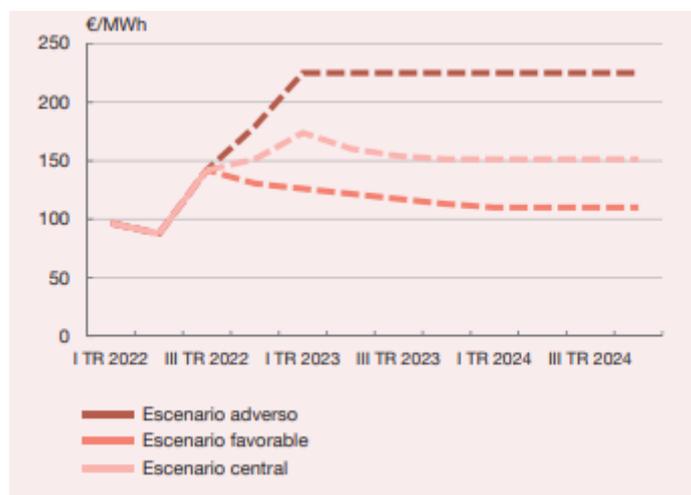


Ilustración 22. Precio del gas natural [44]

En línea con esto, el **Gobierno de España** aprobó el “tope al gas” o mecanismo de ajuste de costes de producción para la reducción del precio de la electricidad en el mercado mayorista por el **Real Decreto Ley 10/2022** por el que se fijaba un precio máximo de 40 €/MWh desde junio a diciembre de 2022 y aumentando su precio máximo en 5 €/MWh por mes hasta alcanzar los 70 €/MWh en junio de 2023, momento en el que dejará de ser aplicable.

Además, se aprobó el **Real Decreto Ley 18/2022** por el que se creó la *Tarifa de Último Recurso* (TUR) de Ahorro Vecinal regulada por el Gobierno de España y destinada a las comunidades de vecinos con calderas comunitarias de gas natural cuyos consumos sean superiores a 50.000 kWh anuales. La tarifa limita los precios del mercado, está subvencionada por el Gobierno y estará vigente hasta diciembre de 2023. Se estima que puede reducir la factura en un 50%. [45]

A nivel impositivo, mediante el **Real Decreto Ley 17/2022** se rebajó desde octubre de 2022 a diciembre de 2022 el Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA) del gas natural del 21% al 5%.

## Equipos y sus características

### Efecto del clima en la bomba de calor y los sistemas de refrigeración

Los sistemas de refrigeración poseen un SEER de 2,65-2,7, no alejado de su EER de 2,70 debido a la menor diferencia de temperaturas entre los dos focos, mientras que las bombas de calor tienen un SCOP de 2,66.

Se recuperan los datos climáticos de la serie 2007-2021 anteriormente empleados en las simulaciones para el estudio de la influencia del calentamiento climático en las demandas de calefacción y refrigeración.

Datos	Rendimiento medio estacional (SPF)	Consumo electricidad [kWh/año]	Variación [%]
<b>Bomba de calor</b>	2,78	12.796	31
<b>Sistemas de refrigeración</b>	2,60	5.271	+13,23

Tabla 45. Rendimiento medio estacional, consumo de electricidad anual y variación del consumo anual con los datos climáticos de la serie 2007-2021

El resultado presenta una disminución esperada en el consumo eléctrico de la calefacción y un aumento en el de la refrigeración como se constató en el anterior apartado. Sin embargo, es remarcable el aumento del rendimiento medio estacional de la bomba de calor en un 4,35% y la disminución de este en el caso de los sistemas de refrigeración en un 3,84%. De forma análoga, se presentan como muy relevantes los datos climáticos introducidos, dado que el rendimiento medio estacional de ambos sistemas depende de ellos y, por ende, la incertidumbre de estos datos afecta doblemente, a las demandas y a los consumos finales.

### Instalación fotovoltaica

Para la estimación de la producción eléctrica fotovoltaica se utiliza el programa **Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)** desarrollado por el **Centro Común de Investigación** de la Comisión Europea. Tras introducir los datos y despreciando las pérdidas de los sistemas, se obtiene una producción eléctrica anual de 22.999,31 kWh. En el caso de incluir las pérdidas (un 14% es lo sugerido por defecto por el programa), la producción eléctrica anual se reduce a 19.779,41 kWh.

Por consiguiente, es de interés estudiar la influencia de las pérdidas en la generación fotovoltaica con el fin de entender la incertidumbre existente.

En **Saeed et al. (2021)** [41], se agrupan las pérdidas de las instalaciones en tres: pérdidas en el propio módulo fotovoltaico, pérdidas por conexión entre paneles y pérdidas por los sistemas. A partir de esta clasificación, se estudia la influencia de estos parámetros en la producción eléctrica de la instalación fotovoltaica.

1. Pérdidas en el propio módulo fotovoltaica
  - *Pérdidas por no cumplimiento de la potencia nominal*

Los módulos fotovoltaicos fabricados no son todos idénticos, sino que su potencia nominal referida a las condiciones estándar de medida (CEM), presenta una ligera dispersión positiva o negativa y siendo lo más habitual situarse en la banda negativa. En el caso del panel escogido, JAM72S20-460/MR, tiene una dispersión de ±5W, suponiendo un 1,08% de la potencia nominal.

– *Pérdidas por ensuciamiento*

Existen diversos factores en el ensuciamiento de los paneles fotovoltaicos. En el Proyecto de Fin de Carrera de **Pablo Nuevo Duque** titulado “**Análisis de factores que influyen en la suciedad de paneles fotovoltaicos y su efecto sobre la producción de energía eléctrica**” [77] se recogen los siguientes: viento, humedad relativa, concentración de partículas en el ambiente, longitud de onda de la luz, ángulo de incidencia, inclinación del panel, tamaño de partícula, lluvia, tormentas de arena, recubrimientos, deposición irregular, y color y opacidad de las partículas.

Como se puede observar, la gran mayoría de los factores son de carácter climático o geográfico. Otros como la inclinación del panel están influenciados por la cubierta donde se instalen los paneles.

En el Proyecto de Fin de Carrera, se realiza una compilación de estudios de las pérdidas por ensuciamiento en diferentes climas. La vista se dirige hacia los estudios con clima mediterráneo y emplazados en España. Se encuentran tres, dos en Málaga y uno en Tudela, con una duración de un año. El número de días con precipitaciones superiores a 1 mm es menor a 50 días, similar al de Zaragoza. Los resultados con diversas inclinaciones concluyen que las pérdidas totales son entre el 4,4% y el 6%. Es destacable que de forma mensual las pérdidas se encuentran entre el 2% y 9%, mientras que durante los meses estivales estas ascienden al 15%. [77]

– *Pérdidas angulares y espectrales*

La potencia nominal de un módulo fotovoltaico suele estar referida a unas condiciones estándar de medida (STC): 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiancia, 25°C de temperatura de célula, incidencia normal y un espectro estándar, AM1.5G.

No obstante, en la realidad las condiciones de operación ni la incidencia de la radiación es normal, ni el espectro es estándar durante todo el tiempo de operación. Una desviación en la incidencia de la radiación solar sobre la superficie de los módulos fotovoltaicos implica unas pérdidas angulares, debidas a la variación del ángulo. Además, estas pérdidas se incrementan con el ensuciamiento debido a la refracción de la radiación a través de los elementos. Por la inclinación de los paneles, PVGIS estima una reducción de la producción fotovoltaica de 3,06%.

Por otro lado, los dispositivos fotovoltaicos son espectralmente selectivos, obteniéndose una corriente generada diferente para cada longitud de onda del espectro solar de la radiación incidente dando lugar a ganancias o pérdidas energéticas. Por la ubicación de la instalación, PVGIS estima que los efectos espectrales incrementan la producción en un 0,65%.

– *Pérdidas por temperatura*

Los módulos fotovoltaicos presentan pérdidas de potencia con el aumento de su temperatura de operación. La temperatura de operación de los módulos fotovoltaicos depende de los factores ambientales de irradiancia, temperatura ambiente y velocidad del viento y de la posición de los módulos o aireación por su parte posterior. En el caso del panel escogido, JAM72S20-460/MR, existe una pérdida de potencia de 0,35%/°C. En el cálculo realizado en PVGIS, se estima que la temperatura y la baja irradiancia reduce la producción eléctrica en un 10,09%.

– *Pérdidas por sombreado*

Si el panel está completa o parcialmente sombreado su producción eléctrica es inferior. Además, en el caso de conexiones en serie de los paneles, como se detalla a continuación, condiciona la potencia máxima producida. Por consiguiente, el sombreado único de un panel puede afectar con gran importancia en la producción global.

2. Pérdidas por conexión entre paneles

A razón de lo anteriormente descrito, el conexionado de módulos fotovoltaicos con potencias ligeramente diferentes ocasiona que sea el módulo con menor potencia el que limite la potencia y, por ende, la producción del resto. En el caso de una instalación en serie, la magnitud limitante será la intensidad, mientras que en una configuración en paralelo lo será el voltaje. Dado el hecho que los paneles fotovoltaicos escogidos y para instalar son de potencia igual y su desviación de la potencia nominal, 1,08%, es pequeña, su efecto es reducido.

3. Pérdidas por los sistemas

– *Pérdidas por caídas óhmicas en el cableado*

En la conducción de la electricidad, tanto en la sección de corriente continua como en la alterna, se producen pérdidas energéticas originadas por caídas de tensión o al efecto Joule. La caída de tensión no puede superar el 5% según el Reglamento electrotécnico para baja tensión (ITC).

– *Pérdidas por rendimiento CA/CC del inversor*

El inversor se puede caracterizar por una curva de rendimiento en función de la potencia de operación. La instalación de potencias superiores o inferiores a la nominal producirá pérdidas en la relación de transformación y una consecuente reducción del rendimiento del equipo. Según la ficha técnica de los inversores a instalar, HUAWEI SUN2000-12KTL-M2, el rendimiento máximo de 98,5% en condiciones nominales. A continuación, se puede observar la curva de rendimiento del inversor.

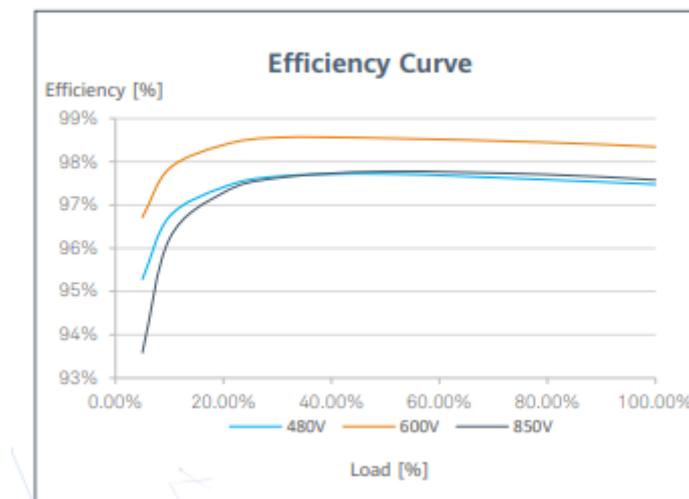


Ilustración 23. Curva de operación del inversor HUAWEI SUN2000-12KTL-M2 [Ficha técnica del inversor]

- Pérdidas por rendimiento de seguimiento del “Maximum Power Point Tracker” (MPPT) de los generadores fotovoltaicos

El inversor cuenta con un dispositivo electrónico de seguimiento del punto de máxima potencia (MPP (*Maximum Power Point*)) de los generadores fotovoltaicos que optimiza la producción eléctrica según la irradiancia y el voltaje. La curva de rendimiento de MPPT se define como el cociente entre la energía que el inversor extrae de los paneles fotovoltaicos y la que extraería en un seguimiento ideal.

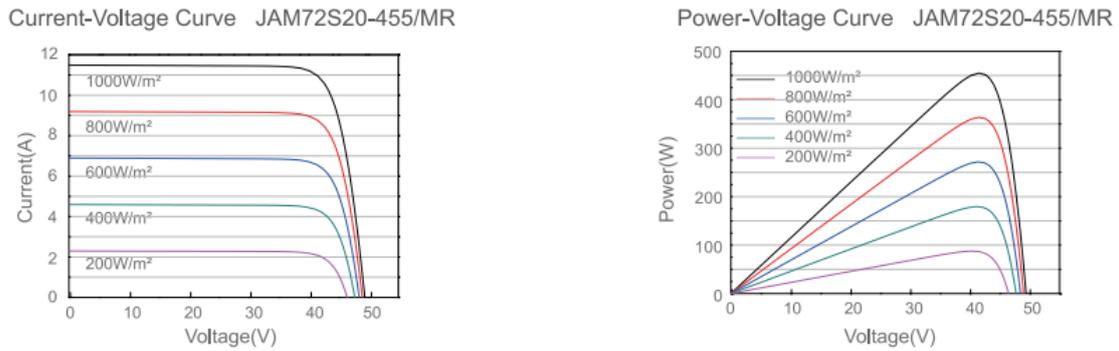


Ilustración 24. Curvas de rendimiento de MPPT [Ficha técnica de los paneles fotovoltaicos]

Como conclusión, existen múltiples fuentes de incertidumbre en diferentes componentes de la instalación, no obstante, sobresalen en su influencia la temperatura de los módulos fotovoltaicos y el ensuciamiento de estos. Dado que para el primer caso no existe solución fácil, debe contemplarse la limpieza anual de los paneles con el fin de maximizar la producción eléctrica de la instalación.

## ANEXO VI. ESTUDIO ECONOMICO

Ante la realización de dos inversiones, cambio de las calderas de gas natural por bombas de calor y la instalación de módulos fotovoltaicos en el tejado, es necesario realizar un estudio económico con el fin de conocer la cuantía económica y el tiempo de retorno o plazo de amortización de las inversiones. No obstante, al encontrarse el estudio sustentado sobre un análisis de incertidumbre, esta se propagará hasta el resultado final, tiempo de retorno.

### Cuantificación de las inversiones a realizar

En el estudio de **Hans-Martin (2015)** [78] relativo a los precios de la energía en 2013 y en 2050 ofrece como valores de referencia, respectivamente, para las bombas de calor de 1.195€/kW y 956€/kW. Por consiguiente y tomando el valor medio, la inversión relativa al cambio del sistema de generación de la calefacción y del agua caliente sanitaria ascendería a 64.745€.

Por otro lado, respecto a la instalación fotovoltaica y dado que trabajo en una empresa dentro del mercado, se incluye un presupuesto con los precios de mercado a **diciembre de 2022**.

DESCRIPCIÓN	Cantidad [Uds.]	Precio unitario [€]	Total [€]
<b>PANELES FOTOVOLTAICOS</b>			
Panel JA SOLAR JAM72S20 MR 460W	30	192,562	5.776,86
<b>ESTRUCTURA PANELES FOTOVOLTAICOS</b>			
Estructura coplanar para panel de 144 células	30	53,719	1.611,57
<b>INVERSOR Y SUS COMPLEMENTOS</b>			
Huawei SUN2000 12KTL-M2	1	3.086,1306	3.086,1306
Huawei Smart Power Sensor	1	227,4615	227,4615
Huawei Smart Dongle	1	166,00	166,00
<b>MATERIAL ELECTRICO</b>			
Cableado y protecciones	1	947,568	947,568
Pequeño material		35,375	35,375
<b>MANO DE OBRA E INSTALACIÓN</b>			
Mano de obra 30 paneles	1	2.465,564	2.465,564
<b>INGENERÍA Y LEGALIZACIÓN</b>			
Proyecto y Dirección de obra	1	850,00	850,00
Legalización mayor de 10 kW	1	1560,00	1560,00
Visado proyecto	1	70,00	70,00
Visado dirección de obra	1	70,00	70,00
<b>TRAMITACIÓN SUBVENCIÓN</b>			
Trámite subvención	1	350,00	350,00
<b>SERVICIO DE ELEVACIÓN DE PANELES</b>			
Grúa para la elevación de 30 paneles	1	800,00	800,00
<b>TOTAL</b>			<b>18.016,53</b>
<b>IVA (21%)</b>			<b>3.783,47</b>
<b>TOTAL CON IVA</b>			<b>21.800</b>

Tabla 46. Presupuesto desglosado de la instalación fotovoltaica

### Impuestos

La instalación de la bomba de calor y los módulos fotovoltaicos en el edificio exige la solicitud de una Licencia de Obra que se puede resolver en el término municipal de Zaragoza mediante una Declaración Responsable. No obstante, esta solicitud lleva aparejada el Impuesto sobre

Construcciones, Instalaciones y Obras (ICIO) que grava toda construcción, instalación u obra para la que se exija la obtención de la correspondiente Licencia de obras o urbanística con un 4% del presupuesto. Por consiguiente, sería necesario realizar un pago de 3.461,80€.

### Incentivos, ayudas y bonificaciones

Ambas actuaciones son elegibles de recibir los incentivos al autoconsumo comentados en el **ANEXO IV**. No obstante, cada una de las actuaciones sigue diferente programa.

En el caso de la bomba de calor, se debería solicitar sería el Programa 6 relativo a las instalaciones de energías renovables térmicas en el sector residencial, que otorga un máximo de 500€/kW o 3000€/vivienda<sup>1</sup>. Dado el valor limitante resulta ser el segundo, la máxima ayuda perceptible sería de 24.000€.

En el caso de la instalación fotovoltaica y al tratarse de un autoconsumo colectivo, tanto la comunidad de propietarios como los propios propietarios de las viviendas, el programa solicitado sería el Programa 4 relativo al autoconsumo renovable en el sector residencial y Administraciones Públicas y tercer sector con o sin almacenamiento, que otorga 535€/kWp instalado<sup>2</sup>. Por consiguiente, la subvención máxima perceptible sería de 7.383€.

El **Ayuntamiento de Zaragoza** dispone de dos bonificaciones relativas a las instalaciones a realizar:

- Bonificación sobre el ICIO: bonificación del 95% del “importe para las construcciones, instalaciones, u obras que consistan en la instalación de sistemas para el aprovechamiento térmico o eléctrico con energía solar, así como la de otras fuentes de energía renovable, en los términos establecidos en la Ordenanza Fiscal n.º 10”. [79] Por consiguiente, el impuesto ICIO a autoliquidar se vería reducido en 3.288,71€.
- Bonificación sobre el Impuesto de Bienes Inmuebles (IBI): bonificación del 30% durante los cinco periodos impositivos siguientes al de la finalización de su instalación los bienes inmuebles en los que “se hayan instalado sistemas para el aprovechamiento térmico o eléctrico de la energía proveniente del sol u otras energías renovables”. [79]

### **Precio de la energía**

Dado que la comunidad de propietarios tiene un consumo superior a los 50.000 kWh anuales en concepto de calefacción y ACS, la comunidad de propietarios podría acogerse a la Tarifa de Último Recurso aprobada por el Gobierno. Por otro lado, podría acoger a una tarifa de una de las comercializadoras del mercado con precio superiores dado que la TUR exige mantener el consumo de gas natural constante al año anterior y su vigencia no excedería un año. A continuación, se presentan un grupo de comercializadoras, sus precios por kWh de gas natural y precio fijo de suministro a fecha de diciembre de 2022 realizada por **Selectra**, comparadora de tarifas de gas natural y electricidad.

<b>Tarifa</b>	<b>Compañía</b>	<b>Precio variable [€/kWh]</b>	<b>Precio Fijo [€/mes]</b>
Tarifa de Último Recurso (TUR)	Gobierno	0,0607	9,52
Plan Gas Hogar	Iberdrola	0,1655	11,18

<sup>1</sup> **Real Decreto 477/2021**; Anexo III; Programa de incentivos 6; Sector residencial; Instalaciones aerotérmicas aire-agua para climatización y/o ACS

<sup>2</sup> **Real Decreto 477/2021**; Anexo III; Programa de incentivos 4; Sector residencial; Instalación Fotovoltaica autoconsumo (10 kWp < P ≤ 100 kWp); Autoconsumo Colectivo

Tarifa Digital Gas	Naturgy	0,1415	10,77
Gas Y Más	Repsol	0,1649	6,48
One Gas	Endesa	0,1503	11,10
A Tu Aire Gas	TotalEnergies	0,1620	18,36

Tabla 47. Tarifas del mercado español del gas natural, su precio variable y precio fijo sin IVA [48]

Por consiguiente, se toma como valor base la media de todos estos valores, precio variable de 0,1408€/kWh y precio fijo de 11,23€/mes. Los casos favorable y desfavorable serán las tarifas con precio variable más bajo y alto, respectivamente, TUR y Plan Gas Hogar.

Por otro lado, en el caso de la electricidad es más complejo dado que, actualmente, existe tres precios para la energía consumida (punta, llano y valle) y dos precios para la potencia (punta y valle). Por consiguiente, la comparativa resulta mucho más difícil. No obstante, se procede a consultar nuevamente la comparadora **Selectra** y se realiza una comparativa entre tres tarifas.

Tarifa	Compañía	Luz punta [€/kWh]	Luz llano [€/kWh]	Luz valle [€/kWh]	Potencia punta [€/kW]	Potencia valle [€/kW]
<b>Tarifas con precio constante</b>						
Flexi Uno	Podo		0,3110		0,0716	0,0031
Luz Siempre	TotalEnergies		0,2178		0,1386	
One Luz	Endesa		0,1504		0,0927	0,0219
<b>Tarifa con precios por horas</b>						
Clásica 3 Precios	Holaluz	0,3870	0,3210	0,2570	0,0716	0,0031
Luz Programa tu Ahorro	TotalEnergies	0,3348	0,2628	0,02365	0,0684	0,0684
Tarifa Noche	Naturgy	0,2205	0,1677	0,1278	0,0839	0,0144

Tabla 48. Tarifas del mercado español de la electricidad, su precio variable y precio fijo sin IVA [46]

Para facilitar los cálculos se van a tomar como referencia de caso base, favorable y desfavorable las tarifas con precio constante, siendo, respectivamente, TotalEnergies, Endesa y Podo. El precio de la potencia se descarta puesto que en ambos casos va a suponer mismo importe, suponiendo que no se hace ninguna ampliación de potencia.

En cuanto al precio de la venta de los excedentes fotovoltaicos, se incluye la siguiente comparativa obtenida igualmente de la comparadora **Selectra**.

Compañía	Tarifa de Autoconsumo	Compensación de excedentes
EDP Solar	Tarifa Plan Ahorro y Tarifa Tranquilidad	0,138 €/kWh
Holaluz	Tarifa Solar un Precio	0,11 €/kWh
Nexus Energía	Tarifa Solar	0,08 €/kWh
Som Energía	2.0TD SOM Generation kWh	0,187 €/kWh
Iner Energía	Tarifa Solar Estable	0,07 €/kWh

Tabla 49. Tarifas del mercado español con venta de excedentes [47]

La media de todas estas tarifas es de 0,117€/kWh vendido. Como precios favorable y desfavorable se escogen, respectivamente, 0,138€/kWh y 0,08€/kWh.

## Desarrollo del estudio

De las variables estudiadas, se descartan las que influyen de forma reducida tanto a las demandas de calefacción como de refrigeración. Estas son: la ventilación, el número de ocupantes permanentes y los huecos. Por otro lado, la influencia de la desocupación permanente de las viviendas se descarta del estudio económico por su bajo efecto en Zaragoza, ciudad de primera residencia.

Por lo tanto, las variables y su influencia en el modelo del estudio económico son:

Variable	Caso base	Caso desfavorable	Caso favorable
Temperatura de consigna	/	Calefacción: -17% Refrigeración: -24%	Calefacción: +38% Refrigeración: +84%
Caldera apagada noche	/	Calefacción: -12%	/
Clima	/	Calefacción: -44% Refrigeración: +7% Afecta a los SPF	/
Fotovoltaica	Pérdidas: 7%	Pérdidas: 0%	Pérdidas: 14%
Aparatos eléctricos	/	Electricidad: -50%	Electricidad: +50%
Iluminación	/	Electricidad: -50%	Electricidad: +116%

Tabla 50. Variables y su influencia en los tres casos en estudio

Cabe destacar que en el caso de los aparatos eléctricos y de la iluminación el porcentaje hace referencia únicamente a su parte. Por otro lado, también participan del estudio los precios del gas, de la luz y de los excedentes a vender que se considerarán un 20% de la producción anual.

El estudio se compone de seis casos. Tres de ellos previos a la rehabilitación y los otros tres restantes posteriores a la rehabilitación. De esta forma, se comparan los resultados económicos de los casos con mismas condiciones, es decir, caso base con caso base e igual con el resto.

Como asunciones, se considera que la pérdida de potencia, aproximadamente un 1%, de los paneles no se tomará en cuenta dada su baja influencia.

De esta manera, se obtiene los siguientes resultados para cada una de las situaciones.

Caso	Consumo gas [kWh]	Consumo electricidad [kWh]	Coste [€/año]
Caso desfavorable	36.308	21.537	5.557
Caso base	55.978	36.732	16.017
Caso favorable	68.874	68.042	32.694

Tabla 51. Consumos y coste anuales del edificio previos a la rehabilitación bajo las condiciones de los tres casos

Caso	Consumo electricidad [kWh]	Producción electricidad [kWh]	Excedentes electricidad [kWh]	Compra electricidad [kWh]	Coste [€/año]
Caso desfavorable	32.774	23.000	4.600	14.374	1.527
Caso base	55.302	21.390	4.278	38.190	7.817
Caso favorable	90.800	19.780	3.956	74.976	23.001

Tabla 52. Consumos, producción y coste anuales del edificio posteriores a la rehabilitación bajo las condiciones de los tres casos

Se observa que, en cualquiera de los casos, el coste anual con los nuevos sistemas reduce el coste anual de los consumos. Los resultados de tiempo de retorno de la inversión resultan en cada uno de los escenarios:

<b>Caso</b>	<b>Tiempo [años]</b>
Caso favorable	5,44
Caso base	6,43
Caso desfavorable	13,08

Tabla 53. Tiempo de retorno de la inversión para cada uno de los casos

En el caso de que las subvenciones no fueran otorgadas por falta de fondos. Los nuevos tiempos de retorno de la inversión serían:

<b>Caso</b>	<b>Tiempo [años]</b>
Caso favorable	8,52
Caso base	10,07
Caso desfavorable	20,49

Tabla 54. Tiempo de retorno de la inversión para cada uno de los casos sin subvenciones

Además, otra ventaja de la rehabilitación energética es la revaloración en el alquiler o la venta a futuro de los inmuebles. En el Artículo 17. 3 del **Real Decreto 390/2021** [80] se indica que “Toda persona física o jurídica que publique o permita la publicación de información sobre la venta o alquiler de un edificio o de parte del mismo, ya sea en agencias inmobiliarias, vallas publicitarias, páginas web, portales inmobiliarios, catálogos, prensa o similares, estará obligada a incluir la información relativa a su calificación de eficiencia energética”.

Por consiguiente, la certificación energética es de obligada comunicación a los nuevos inquilinos o los futuros compradores. En el informe “**Eficiencia Energética y su impacto económico en la vivienda**” [81] realizado por **Colliers** y **Balantia**, se indica que la mejora de dos escalas energéticas aumenta el precio de compra en un 8-12% y en el precio del alquiler en un 8-13%.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Agencia Internacional de la Energía, «IEA-Mission», 2020. <https://www.iea.org/about/mission> (accedido jun. 22, 2022).
- [2] Agencia Internacional de la Energía, «Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector», p. 24, 2021.
- [3] Comisión Europea, «La eficiencia energética de los edificios», feb. 17, 2020. [https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-lut-17\\_es](https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-lut-17_es).
- [4] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Guía práctica para la gestión de ayudas a la rehabilitación energética de edificios», 2021, [En línea]. Disponible en: <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>.
- [5] M. H. Abbasi, B. Abdullah, M. W. Ahmad, A. Rostami, y J. Cullen, «Heat transition in the European building sector: Overview of the heat decarbonisation practices through heat pump technology», *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 48, n.º September, p. 101630, 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101630.
- [6] S. Palos Andreu, «Bomba de calor por compresión para sistemas de distrito: recopilación de equipos comercialmente disponibles y análisis de sus principales características para la simulación de sistemas», 2018.
- [7] J. Roche Lázaro, «Bombas de calor de gran potencia para sistemas de calefacción y refrigeración de distrito. Caracterización del funcionamiento a carga parcial», 2019.
- [8] D. Douglas-Smith, T. Iwanaga, B. F. W. Croke, y A. J. Jakeman, «Certain trends in uncertainty and sensitivity analysis: An overview of software tools and techniques», *Environ. Model. Softw.*, vol. 124, n.º November 2019, p. 104588, 2019, doi: 10.1016/j.envsoft.2019.104588.
- [9] C. Carpino, R. Bruno, V. Carpino, y N. Arcuri, «Improve decision-making process and reduce risks in the energy retrofit of existing buildings through uncertainty and sensitivity analysis», *Energy Sustain. Dev.*, vol. 68, pp. 289-307, 2022, doi: 10.1016/j.esd.2022.04.007.
- [10] C. Carpino, R. Bruno, V. Carpino, y N. Arcuri, «Uncertainty and sensitivity analysis to moderate the risks of energy performance contracts in building renovation: A case study on an Italian social housing district», *J. Clean. Prod.*, vol. 379, n.º P1, p. 134637, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134637.
- [11] CYPE, «CYPETHERM HE Plus: Manual de Uso», 2021, [En línea]. Disponible en: <http://cypetherm-he-plus.cype.es>.
- [12] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Guía de procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios», 2008.
- [13] P. van den Brom, A. R. Hansen, K. Gram-Hanssen, A. Meijer, y H. Visscher, «Variances in residential heating consumption – Importance of building characteristics and occupants analysed by movers and stayers», *Appl. Energy*, vol. 250, n.º March, pp. 713-728, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.05.078.
- [14] D. Cali, T. Osterhage, R. Streblow, y D. Müller, «Energy performance gap in refurbished German dwellings: Lesson learned from a field test», *Energy Build.*, vol. 127, pp. 1146-1158, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.05.020.
- [15] M. Herrando, D. Cambra, M. Navarro, L. de la Cruz, G. Millán, y I. Zabalza, «Energy Performance Certification of Faculty Buildings in Spain: The gap between estimated and

- real energy consumption», *Energy Convers. Manag.*, vol. 125, n.º January 2014, pp. 141-153, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.04.037.
- [16] Ministerio de Transportes Movilidad Urbana y Agenda Urbana, «Documento Básico HE Ahorro de energía», 2022.
- [17] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Guías IDAE 018: Soluciones de acristalamiento y cerramiento acristalado», 2019.
- [18] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Guía técnica de eficiencia energética en iluminación: Hospitales y centros de atención primaria», 2020.
- [19] efectoLED, «Niveles de iluminación recomendados en viviendas», 2018. <https://www.efectoled.com/blog/es/niveles-iluminacion-recomendados-viviendas/> (accedido ago. 23, 2022).
- [20] IMventa, «Manual iMventa: Elementos». <https://www.imventa.com/ayuda/CLwin/Elementos.htm> (accedido ago. 25, 2022).
- [21] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Guía técnica de instalaciones de climatización con equipos autónomos», 2012.
- [22] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, «Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios», 2020.
- [23] Agencia Internacional de la Energía, «Solar PV: More efforts needed». <https://www.iea.org/reports/solar-pv> (accedido oct. 25, 2022).
- [24] Agencia Internacional de la Energía, «Renewables 2021: Executive summary», 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/renewables-2021/executive-summary>.
- [25] Comisión Europea, «In focus: Solar energy – harnessing the power of the sun». [https://ec.europa.eu/info/news/focus-solar-energy-harnessing-power-sun-2022-sep-05\\_en](https://ec.europa.eu/info/news/focus-solar-energy-harnessing-power-sun-2022-sep-05_en) (accedido oct. 25, 2022).
- [26] Comisión Europea, «Solar energy», 2022. [https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/solar-energy\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/solar-energy_en) (accedido oct. 25, 2022).
- [27] Red Eléctrica de España, «Potencia instalada (MW)». <https://www.ree.es/es/datos/generacion/potencia-instalada> (accedido oct. 25, 2022).
- [28] Z. Wang, M. B. Luther, M. Amirkhani, C. Liu, y P. Horan, «State of the art on heat pumps for residential buildings», *Buildings*, vol. 11, n.º 8, 2021, doi: 10.3390/buildings11080350.
- [29] P. Byrne, «Research Summary and Literature Review on Modelling and Simulation of Heat Pumps for Simultaneous Heating and Cooling for Buildings», *Energies*, vol. 15, n.º 3529, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/en15103529>.
- [30] Comisión Europea, «The availability of refrigerants for new split air conditioning systems that can replace fluorinated greenhouse gases or result in a lower climate impact», 2020.
- [31] I. A. Macdonald, «Quantifying the Effects of Uncertainty in Building Simulation», University of Strathclyde, 2002.
- [32] F. Domínguez-Muñoz, J. M. Cejudo-López, y A. Carrillo-Andrés, «Uncertainty in peak cooling load calculations», *Energy Build.*, vol. 42, n.º 7, pp. 1010-1018, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.01.013.
- [33] M. Koniorczyk, W. Grymin, M. Zygmunt, y D. Gawin, «Novel stochastic approach to predict the energy demand and thermal comfort in the office buildings considering

- materials and human-related Gaussian uncertainties», *J. Build. Eng.*, vol. 42, n.º May, p. 102831, 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102831.
- [34] A. Amadeh, Z. E. Lee, y K. M. Zhang, «Quantifying demand flexibility of building energy systems under uncertainty», *Energy*, vol. 246, p. 123291, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123291.
- [35] Instituto Nacional de Estadística, «Censos de Población y Viviendas 2011», 2013.
- [36] Instituto Nacional de Estadística, «Encuesta de hogares y medioambiente 2008. Calefacción y aire acondicionado», pp. 1-8, 2009, [En línea]. Disponible en: <http://www.ine.es/jaxi/menu.do?type=pcaxis&path=/t25/p500&file=inebase&L=0>.
- [37] C. Giraldo-Soto, L. Mora, A. Erkoreka, I. Uriarte, y P. Eguia, «Overall uncertainty analysis of zonal indoor air temperature measurement in an in-use office building», *Build. Environ.*, vol. 219, p. 109123, 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109123.
- [38] «Climate.OneBuilding». <https://climate.onebuilding.org/> (accedido nov. 10, 2022).
- [39] M. Bhandari, S. Shrestha, y J. New, «Evaluation of weather datasets for building energy simulation», *Energy Build.*, vol. 49, pp. 109-118, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.01.033.
- [40] J. M. Cuadrat Prats, M. Á. Saz Sánchez, R. Serrano-Notivoli, y E. Tejedor, «El clima del término municipal de Zaragoza en el contexto del cambio global», 2014, [En línea]. Disponible en: <https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/clima.pdf>.
- [41] F. Saeed y A. Zohaib, «Quantification of losses in a photovoltaic system: A review», p. 35, 2021, doi: 10.3390/asec2021-11200.
- [42] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «El gas natural». <https://energia.gob.es/Gas/Paginas/Index.aspx> (accedido dic. 08, 2022).
- [43] Junta de Castilla y León, «Plantas de almacenaje y regasificación de España». <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/plantas-almacenaje-regasificacion-espana.html> (accedido dic. 08, 2022).
- [44] Banco de España, «Boletín Económico 3/2022», 2022, doi: 10.31548/zemleustriy2022.03.
- [45] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Respuestas a las preguntas más frecuentes sobre la nueva tarifa de Ahorro Vecinal para calderas comunitarias». <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/respuestas-a-las-preguntas-más-frecuentes-sobre-la-nueva-tarifa-de-ahorro-vecinal-para-calderas-comunitarias/tcm:30-546684> (accedido dic. 08, 2022).
- [46] Selectra, «Precio de la luz». <https://selectra.es/energia/info/que-es/precio-kwh> (accedido dic. 11, 2022).
- [47] Selectra, «Precio de excedentes en autoconsumo». <https://climate.selectra.com/es/placas-solares/precio-excedentes-autoconsumo-pvpc> (accedido dic. 11, 2022).
- [48] Selectra, «Precio del kWh de gas natural en España». <https://precioogas.com/suministro-gas/tarifas-gas/precio-kwh> (accedido dic. 11, 2022).
- [49] Consejo Europeo y Consejo de la Unión Europea, «Objetivo 55», *Pacto Verde Europeo*, 2022. [www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/](http://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/) (accedido oct. 13, 2022).
- [50] B. Pérez Martín, «Reducción de las demandas de calefacción, refrigeración y ACS, a lo largo de la evolución normativa», *Univ. Zaragoza*, 2020.

- [51] U.S. Department of Energy, «EnergyPlus Essentials», 2021, [En línea]. Disponible en: [https://energyplus.net/assets/nrel\\_custom/pdfs/pdfs\\_v9.5.0/EnergyPlusEssentials.pdf](https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.5.0/EnergyPlusEssentials.pdf).
- [52] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Calificación de la eficiencia energética de los edificios», 2015.
- [53] J. Fernández Seara, «Sesión plenaria CYTEF», 2018.
- [54] Boletín Oficial del Estado, «Ley 16/2013, de 29 de octubre, por la que se establecen determinadas medidas en materia de fiscalidad medioambiental y se adoptan otras medidas tributarias y financieras», 2013.
- [55] Diario Oficial de la Unión Europea, «Decisión de la Comisión de 1 de marzo de 2013», n.º 5, pp. 27-35, 2016.
- [56] P. Breeze, «Solar power», en *Power Generation Technologies*, Elsevier Science & Technology, 2005.
- [57] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Ayudas y financiación para energías renovables en autoconsumo, almacenamiento, y térmicas sector residencial», 2022. <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-energias-renovables-en-autoconsumo-almacenamiento-y-termicas-sector> (accedido oct. 24, 2022).
- [58] L. Schipper, S. Bartlett, D. Hawk, y E. Vine, «Linking life-styles and energy use: a matter of time?», *Annu. Rev. energy. Vol. 14*, pp. 273-320, 1989, doi: 10.1146/annurev.eg.14.110189.001421.
- [59] C. Hiller, «Influence of residents on energy use in 57 Swedish houses measured during four winter days», *Energy Build.*, vol. 54, pp. 376-385, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.06.030.
- [60] R. H. Socolow, «The twin rivers program on energy conservation in housing: Highlights and conclusions», *Energy Build.*, vol. 1, n.º 3, pp. 207-242, 1978, doi: 10.1016/0378-7788(78)90003-8.
- [61] I. M. Zarco-Soto, F. J. Zarco-Soto, y P. J. Zarco-Periñán, «Influence of population income on energy consumption and co2 emissions in buildings of cities», *Sustain.*, vol. 13, n.º 18, 2021, doi: 10.3390/su131810230.
- [62] S. Wang, Z. Xie, y R. Wu, «Examining the effects of education level inequality on energy consumption: Evidence from Guangdong Province», *J. Environ. Manage.*, vol. 269, n.º April, p. 110761, 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110761.
- [63] P. Grünwald y M. Diakonova, «Societal differences, activities, and performance: Examining the role of gender in electricity demand in the United Kingdom», *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 69, n.º November 2019, p. 101719, 2020, doi: 10.1016/j.erss.2020.101719.
- [64] Banco de España, «Encuesta financiera de las familias (EFF) 2020: métodos, resultados y cambios desde 2017», 2022.
- [65] Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones, «Informe Anual de 2021», 2022.
- [66] UNESPA, «En España circulaban 674.000 coches híbridos y eléctricos en 2020». <https://www.unespa.es/notasdeprensa/automovil-tipos-motor-2020/> (accedido oct. 03, 2022).
- [67] Consejo de la Unión Europea, «Acuerdo sobre la primera propuesta del paquete “Objetivo 55”: la UE refuerza los objetivos de emisiones de CO2 para turismos y furgonetas nuevos», 2022. <https://www.consilium.europa.eu/es/press/press-releases/2022/10/27/first-fit-for-55-proposal-agreed-the-eu-strengthens-targets-for-co2->

- emissions-for-new-cars-and-vans/ (accedido nov. 27, 2022).
- [68] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «PROGRAMA MOVES III». <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-movilidad-y-vehiculos/programa-moves-iii> (accedido oct. 04, 2022).
- [69] Organización de Países Exportadores de Petróleo, «OPEC Monthly Oil Market».
- [70] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Justificación del consumo anual de energía igual o superior al 80% de la energía generada por la instalación», 2022.
- [71] Ministerio de Fomento, «Zonificación climática en función de la radiación solar global media diaria anual», 2011.
- [72] BP, «A global view of gas - in maps and charts», 2017. <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/reimagining-energy/global-view-of-gas-infographic.html> (accedido dic. 09, 2022).
- [73] McKinsey & Company, «Global Gas Outlook to 2050», 2021, [En línea]. Disponible en: [https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/oil\\_and\\_gas/our\\_insights/global\\_gas\\_outlook\\_to\\_2050/global\\_gas\\_outlook\\_2050\\_final.pdf](https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/oil_and_gas/our_insights/global_gas_outlook_to_2050/global_gas_outlook_2050_final.pdf).
- [74] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Exploración y producción de hidrocarburos en España». <https://energia.gob.es/petroleo/Exploracion/Paginas/Estadisticas.aspx> (accedido dic. 08, 2022).
- [75] Enagas, «Resultados 9M 2022», 2022.
- [76] Enagas, «El sistema gasista español en 2021», 2021.
- [77] P. Nuevo Duque, «Análisis de factores que influyen en la suciedad de paneles fotovoltaicos y su efecto sobre la producción de energía eléctrica», p. 115, 2016.
- [78] A. P. Hans-Martin Henning, «Was kostet die Energiewende?», *Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE*, 2015, doi: 10.1007/978-3-662-57787-5\_8.
- [79] Ayuntamiento de Zaragoza, «Bonificaciones fiscales a la instalación de renovables en Zaragoza». <https://www.zaragoza.es/sede/portal/medioambiente/cambio-climatico/ayudas-subsuenciones/> (accedido dic. 10, 2022).
- [80] Boletín Oficial del Estado, «Real Decreto 390/2021», 2021. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2021/BOE-A-2021-9176-consolidado.pdf> (accedido dic. 08, 2022).
- [81] Colliers y Balantia, «Eficiencia Energética y su impacto económico en la Vivienda», 2022.
- [82] NORDICGHP y J. Brown, «How Low Can Nordic Heat Pumps Go?», 2017. <https://www.nordicghp.com/2017/01/heat-pump-effective-temperature-range/> (accedido sep. 03, 2022).
- [83] Government of Canada, «Heating and Cooling With a Heat Pump», 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.nrcan.gc.ca/energy-efficiency/energy-star-canada/about/energy-star-announcements/publications/heating-and-cooling-heat-pump/6817#o>.