



# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis de viabilidad técnico-económica de la bomba de calor aerotérmica accionada mediante gas natural para viviendas en bloque como medida activa contra la pobreza energética.

Autor:  
Álvaro Izaguirre de Benito

Directores:  
José Ignacio Linares Hurtado  
Roberto Barrella

Madrid  
Agosto de 2021

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
Análisis de viabilidad técnico-económica de la bomba de calor  
aerotérmica accionada mediante gas natural para viviendas en bloque como  
medida activa contra la pobreza energética  
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2020-2021 es de mi autoría, original e inédito y  
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es  
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada  
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Álvaro Izaguirre de Benito

Fecha: 25/ 08/ 2021



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO





# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis de viabilidad técnico-económica de la bomba de calor aerotérmica accionada mediante gas natural para viviendas en bloque como medida activa contra la pobreza energética.

Autor:

Álvaro Izaguirre de Benito

Directores:

José Ignacio Linares Hurtado

Roberto Barrella

Madrid

Agosto de 2021

## **Agradecimientos**

Agradezco a los directores de este proyecto, José Ignacio Linares Hurtado y Roberto Barrella, su paciencia y gran ayuda para realizar este trabajo. También querría agradecer a SEDIGAS su colaboración para hacer este trabajo posible.

# ANÁLISIS DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LA BOMBA DE CALOR AEROTÉRMICA ACCIONADA MEDIANTE GAS NATURAL PARA VIVIENDAS EN BLOQUE COMO MEDIDA ACTIVA CONTRA LA POBREZA ENERGÉTICA.

**Autor:** Álvaro Izaguirre de Benito

**Directores:** José Ignacio Linares Hurtado y Roberto Barrella.

**Entidad colaboradora:** Catedra de Energía y Pobreza (ICAI – Universidad Pontificia Comillas).

## Resumen del proyecto

### Abstract

La pobreza energética puede definirse como la situación en la que un hogar no puede hacer frente al pago de las facturas necesarias para mantener unas condiciones en las que se cubran las necesidades energéticas manteniendo unas condiciones de confort. Una de las formas de luchar contra la pobreza energética es el uso de equipos eficientes que puedan cubrir las necesidades energéticas con un coste de energía bajo.

En este trabajo se ha decidido estudiar la viabilidad técnica y económica de la bomba de calor aerotérmica accionada mediante gas natural. Para ello se ha realizado un estudio de la demanda térmica según la zona climática en la que se encuentre el edificio, se ha caracterizado el comportamiento de las bombas de calor empleadas y se ha realizado un análisis económico y de la energía primaria consumida. También se ha evaluado el coste normalizado de la energía para las zonas climáticas D3, A4 y E1 teniendo en cuenta

las distintas configuraciones posibles de la bomba de calor: calefacción, calefacción y agua caliente sanitaria, y climatización y agua caliente sanitaria.

Se ha podido observar que la opción de utilizar la bomba de calor para calefacción no es lo suficientemente atractiva económicamente si se compara con el resto de las configuraciones posibles. En las situaciones en las que las bombas de calor han sido configuradas para proporcionar climatización y agua caliente sanitaria para el propio edificio se han alcanzado costes normalizados de la energía muy similares a los obtenidos cuando se emplea una caldera central (73,54€/MWh), que es el sistema de climatización más económico.

También se ha estudiado la posibilidad de aprovechar completamente el calor generado por el motor de gas y así poder cubrir parte de las necesidades de agua caliente sanitaria de edificios cercanos, lo que puede reducir más el coste normalizado de la energía hasta valores de 67€/MWh. En el análisis de los consumos de energía primaria se ha comprobado que sería necesario mejorar el aislamiento térmico del edificio para poder cumplir los requisitos fijados por el Código Técnico de la Edificación.

**Palabras clave:** Pobreza energética; bomba de calor; demanda térmica; agua caliente sanitaria; energía primaria.

## **Introducción**

La pobreza energética se define como “la situación en la que un hogar es incapaz de pagar una cantidad de energía suficiente para la satisfacción de sus necesidades domésticas y/o cuando se ve obligado a destinar una parte excesiva de sus ingresos a

pagar la factura energética de su vivienda ya sea debido a una falta de ingresos mínimos o por vivir en una vivienda ineficiente energéticamente”. Esta pobreza energética es la que fuerza a muchos hogares a reducir el consumo energético de sus hogares manteniendo unas condiciones lejanas a las consideradas de confort. En este proyecto se estudiará la viabilidad de una bomba de calor aerotérmica accionada mediante gas natural para cubrir las distintas necesidades energéticas de un hogar como fórmula de ahorro energético.

### **Definición del proyecto**

Para el desarrollo del proyecto será necesario obtener la demanda térmica en distintas zonas climáticas. Para ello se utilizarán una serie de ecuaciones que han sido desarrolladas para el cálculo de la demanda térmica en España y los archivos MET que contienen la información meteorológica necesaria para obtener esta demanda.

Se obtendrán mediante regresiones lineales las ecuaciones que rigen el funcionamiento de las bombas de calor accionadas mediante gas natural. Esto será imprescindible a la hora de dimensionar las instalaciones y para la obtención de la información necesaria para los análisis posteriores.

Por último, se realizarán los análisis económicos para todas las situaciones estudiadas y se compararán los resultados con los obtenidos con otras fuentes de energía. Además, se estudiará la necesidad de mejorar el aislamiento térmico del edificio si no se pudiese cumplir con los requisitos de energía primaria establecidos en el Código Técnico de la Edificación.

## Resultados

Se ha determinado la demanda térmica horaria para cada una de las zonas climáticas presentes en España. Con esta información y para poder comprender el comportamiento de la demanda se han representado las monótonas de la demanda de energía térmica según la zona climática y la estación.

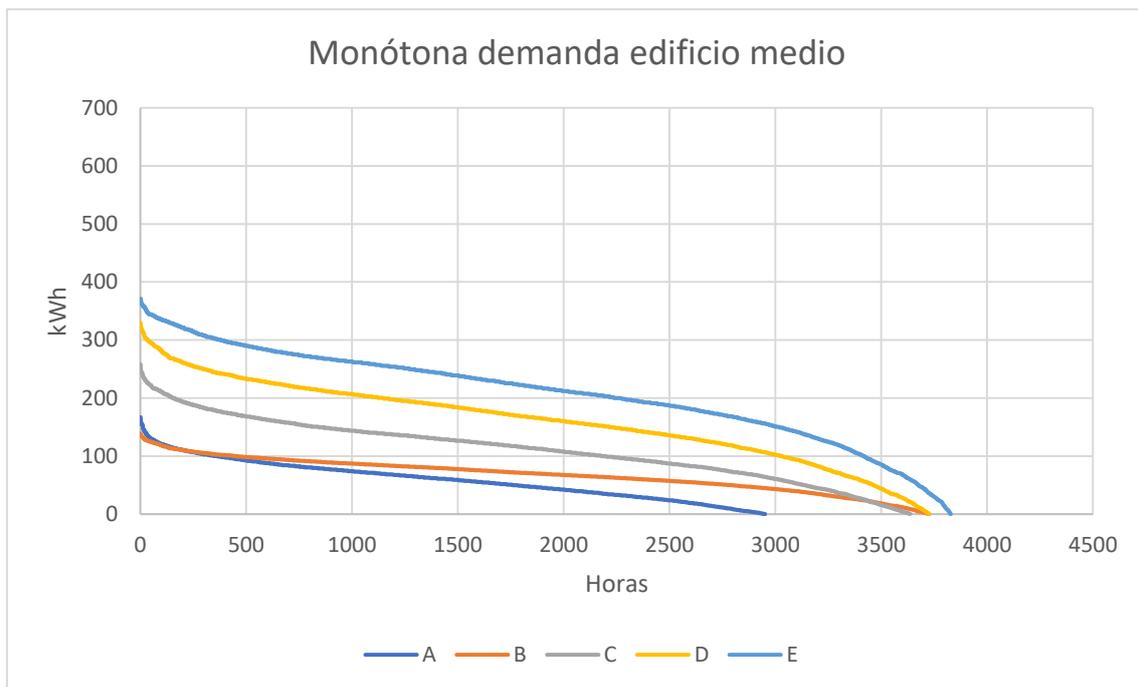
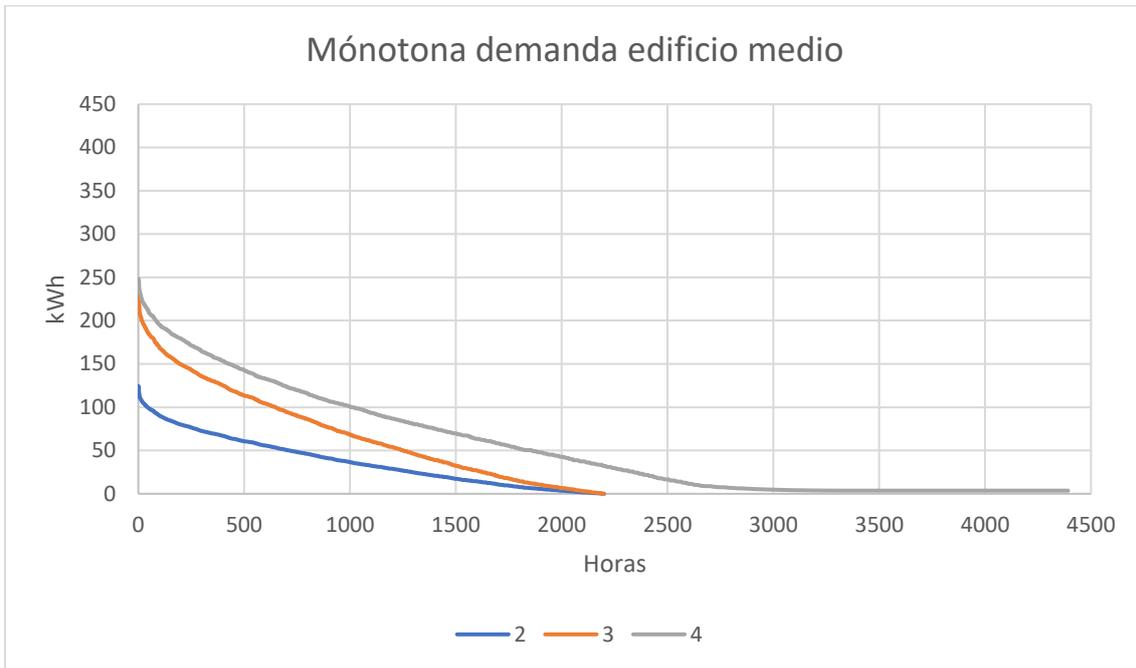
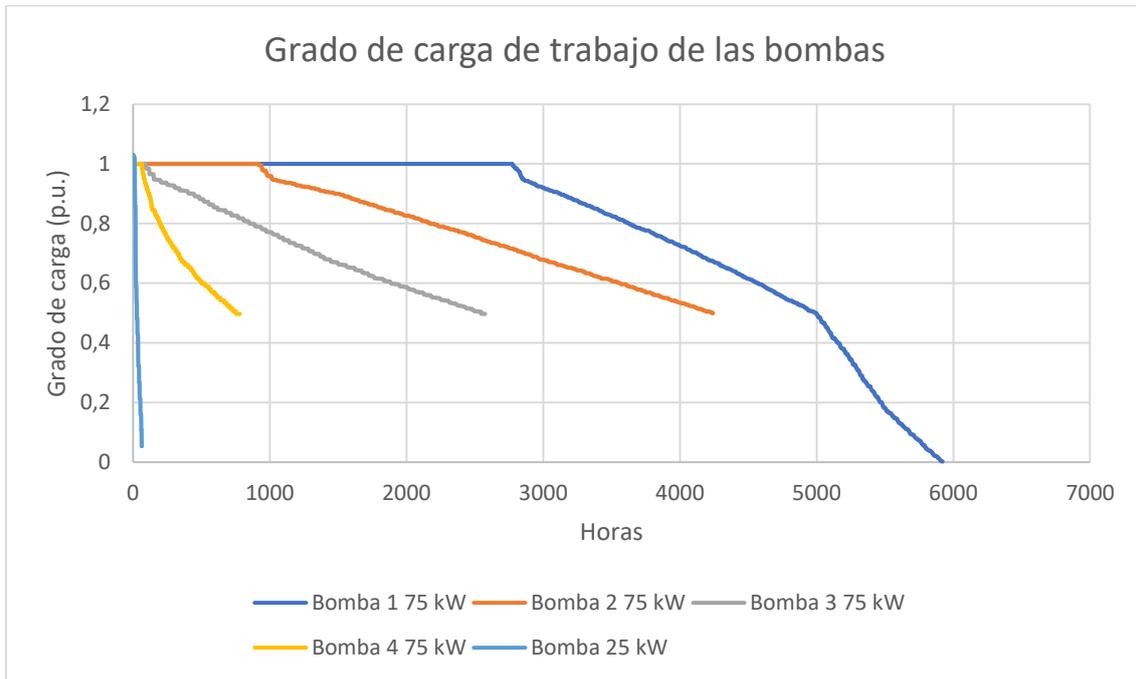


Figura Resumen 1: Monótona de la demanda térmica en invierno para un edificio de 6.000 m<sup>2</sup> y un aislamiento medio.



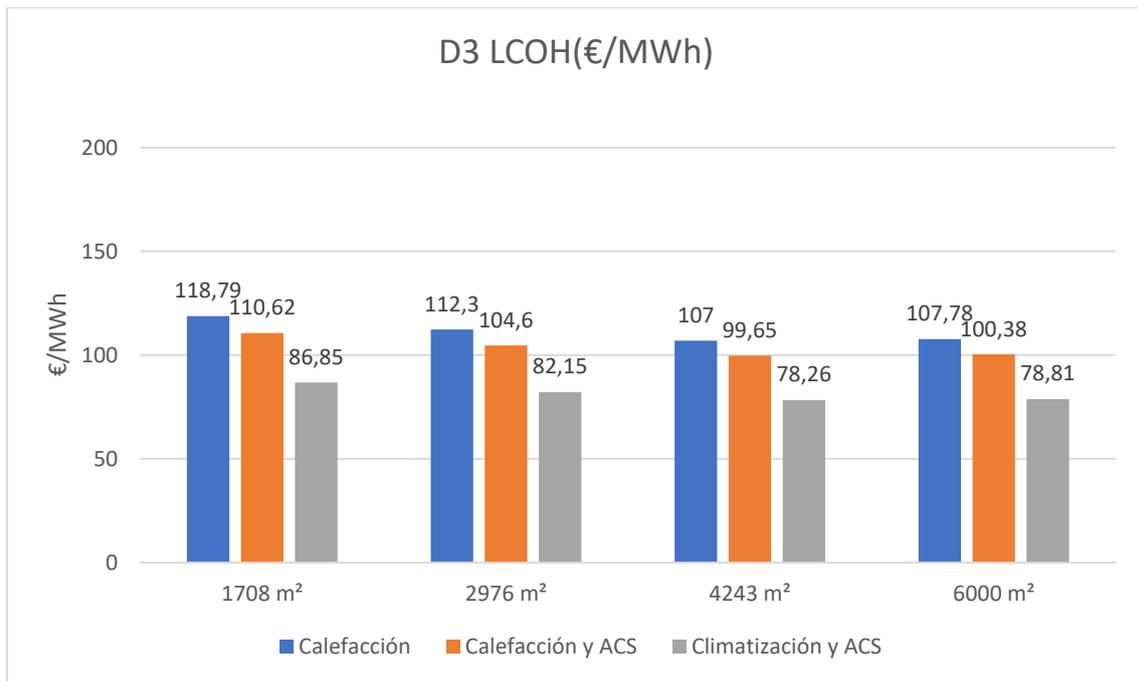
*Figura Resumen 2: Monótona de la demanda térmica en verano para un edificio de 6.000 m<sup>2</sup> y un aislamiento medio.*

Por otra parte, se ha podido determinar el comportamiento de las bombas de calor frente a las distintas condiciones a las que tendrá que hacer frente. En la Figura 3 se ve la monótona del grado de carga al que trabajan las bombas en un edificio de 6.000 m<sup>2</sup> en una zona climática D3.



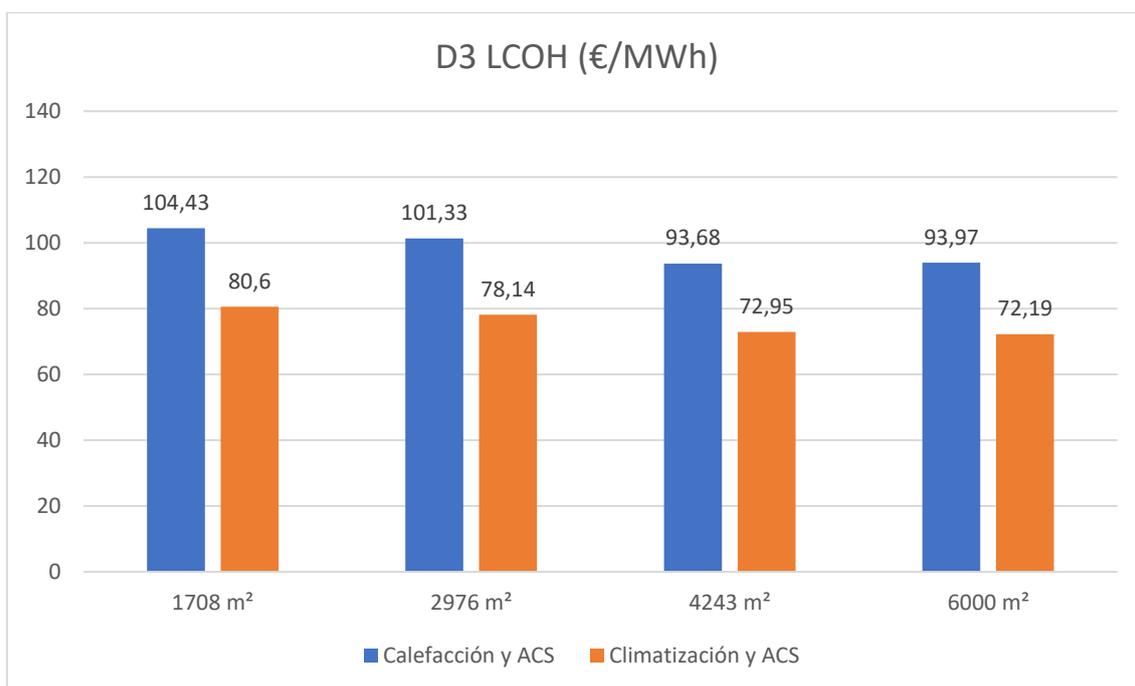
*Figura Resumen 3: Monótona del grado de carga de las bombas en una instalación de 6.000 m<sup>2</sup> en una zona D3.*

Con todo ello se ha podido realizar un análisis económico, con el que, teniendo en cuenta todos los gastos esperados durante la vida del proyecto, se han calculado los costes normalizados de la energía.



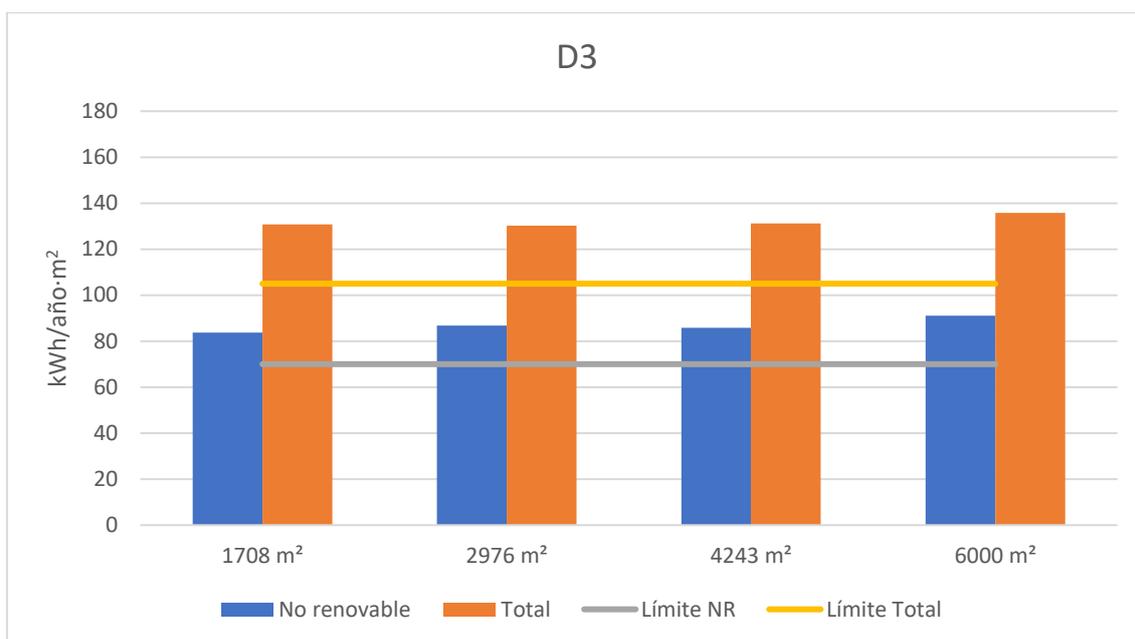
*Figura Resumen 4: LCOH para una zona D3.*

Como se puede observar en la Figura 4, la incorporación del ACS reduce significativamente el coste de la energía, debido a que no se desecha al ambiente el calor generado por el motor. Pero es tal el calor generado por el motor que, una vez cubiertas las necesidades de ACS del propio edificio, es posible suministrar con ACS a otro edificio. Si se incorpora esta posibilidad en el cálculo económico obtenemos los costes de la Figura 5.



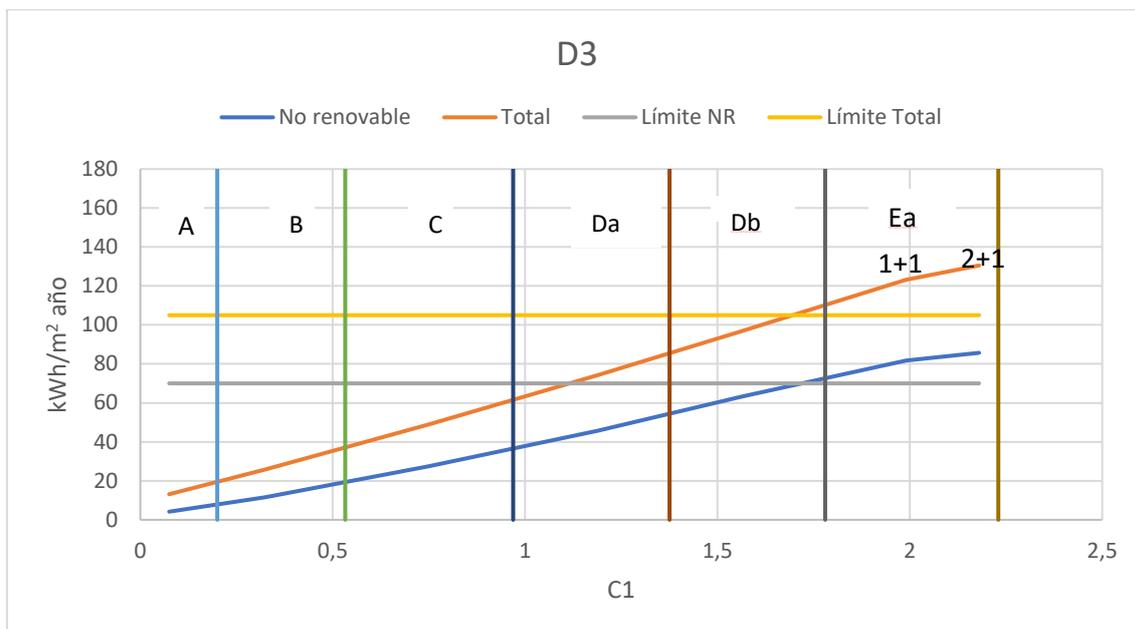
*Figura Resumen 5: LCOH para una zona D· aprovechando todo el calor del motor.*

Como se observa en la Figura 5, incrementar el consumo de la energía proporcionada reduce significativamente el precio normalizado de la energía hasta casi alcanzar el coste de la energía más barata, el de la caldera central (73,54€/MWh). Una vez realizado el cálculo económico se obtiene el consumo de energía primaria del sistema para ver si cumplen con los requisitos fijados por el Código Técnico de la Edificación (Figura 6).



*Figura Resumen 6: Consumo de energía primaria para un edificio en una zona D3.*

Como se puede observar en la Figura 6, se superan los límites máximos de consumo de energía primaria renovable y total. Al estar estos límites fijados para edificios existentes, aplicables tras la realización de una reforma de cierta entidad, es posible actuar incrementando el nivel de aislamiento del edificio. Para determinar el cambio necesario de calificación energética se procede a obtener una gráfica en la que se vean los efectos del aislamiento térmico en la energía primaria para ciertos valores de aislamiento térmico (Figura 7).



*Figura Resumen 7: Efectos del aislamiento en el consumo de energía primaria en un edificio en la zona D3 de 2.500 m<sup>2</sup>.*

Como se desprende de la Figura 7, apenas es necesaria una ligera mejora de la calificación energética para poder satisfacer las restricciones de consumo de energía primaria fijadas por el Código Técnico de la Edificación.

Lamentablemente, aunque el calor para el agua caliente sanitaria procede del motor térmico y por tanto es cogeneración, no es renovable, por lo que no se cumple el criterio de mínima cobertura de energía renovable generada in situ exigido por el Código Técnico de la Edificación. Incluso aunque el gas natural se sustituyese por biometano, que no sería generado in situ, no se cumpliría. Este aspecto es una importante limitación de la actual normativa.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que la bomba de calor aerotérmica accionada mediante gas natural es una solución viable para la lucha contra la pobreza energética. Es una solución que puede cubrir todas las necesidades térmicas de un bloque de viviendas con precio de la energía similar al de la caldera central. Además, la

tecnología es bastante atractiva desde el punto de vista medioambiental ya que es capaz de proporcionar más calor útil que el proporcionado por la combustión del gas.

Es necesario tener en cuenta que para poder cumplir con los requisitos de consumo de energía primaria puede que sea necesario realizar una reforma exprés para mejorar la calificación energética del edificio. Lamentablemente, las exigencias de la reglamentación actual sobre la cobertura de renovables en la preparación del agua caliente sanitaria no se cumplen.

# TECHNICAL-ECONOMIC VIABILITY ANALYSIS OF THE AEROTHERMAL HEAT PUMP DRIVEN BY NATURAL GAS FOR BLOCK HOUSING AS AN ACTIVE MEASURE AGAINST ENERGY POVERTY.

**Author:** Álvaro Izaguirre de Benito

**Supervisors:** José Ignacio Linares Hurtado and Roberto Barrella

**Collaborating Entity:** Chair of Energy and Poverty (ICAI – Universidad Pontificia Comillas).

## **Project summary**

### **Abstract**

Energy poverty can be defined as the situation in which a household cannot afford to pay the bills necessary to maintain conditions in which energy needs are met while maintaining conditions of comfort. One of the ways to combat energy poverty is the use of energy-efficient equipment that can meet energy needs at a low energy cost.

In this project it has been decided to study the technical and economic feasibility of the aerothermal heat pump powered by natural gas. To this end, a study of the thermal demand has been carried out according to the climate zone in which the building is located, the heat pumps behavior has been characterized, an economic analysis has been done and an analysis of the primary energy consumed. The levelized cost of energy for climate zones D3, A4 and E1 has been assessed considering the different possible configurations of the heat pump: heating, heating with domestic hot water and HVAC (heating and cooling) with domestic hot water.

It has been observed that the option of using the heat pump for heating is not economically attractive enough when compared to the rest of the possible configurations. In situations in which the heat pumps have been configured to provide air conditioning and domestic hot water for the building itself, the levelized energy costs that have been achieved are very similar to those obtained when using a central boiler (73.54 €/MWh), which is the most economical heating system.

It has also been analyzed the possibility of taking full advantage of the heat generated by the gas engine and thus be able to cover part of the needs of domestic hot water of nearby buildings; doing this can further reduce the normalized cost of energy to values close to 67€/MWh. In the analysis of primary energy consumption, we have found that it would be necessary to improve the thermal insulation of the building in order to meet the requirements of the technical code.

**Keywords:** Energy poverty; heat pump; thermal demand; sanitary hot water; primary energy.

## **Introduction**

Energy poverty is defined as "the situation in which a household is unable to pay for a sufficient amount of energy to meet its domestic needs and/or when it is forced to allocate an excessive part of its income to pay the energy bill for its home either due to a lack of minimum income or by living in an energy-inefficient home." This energy poverty is what forces many households to reduce the energy consumption of their homes while maintaining conditions far from those considered as comfortable. This project will study the feasibility of an aérothermal heat pump powered by natural gas to cover the different energy needs of a home.

## **Project definition**

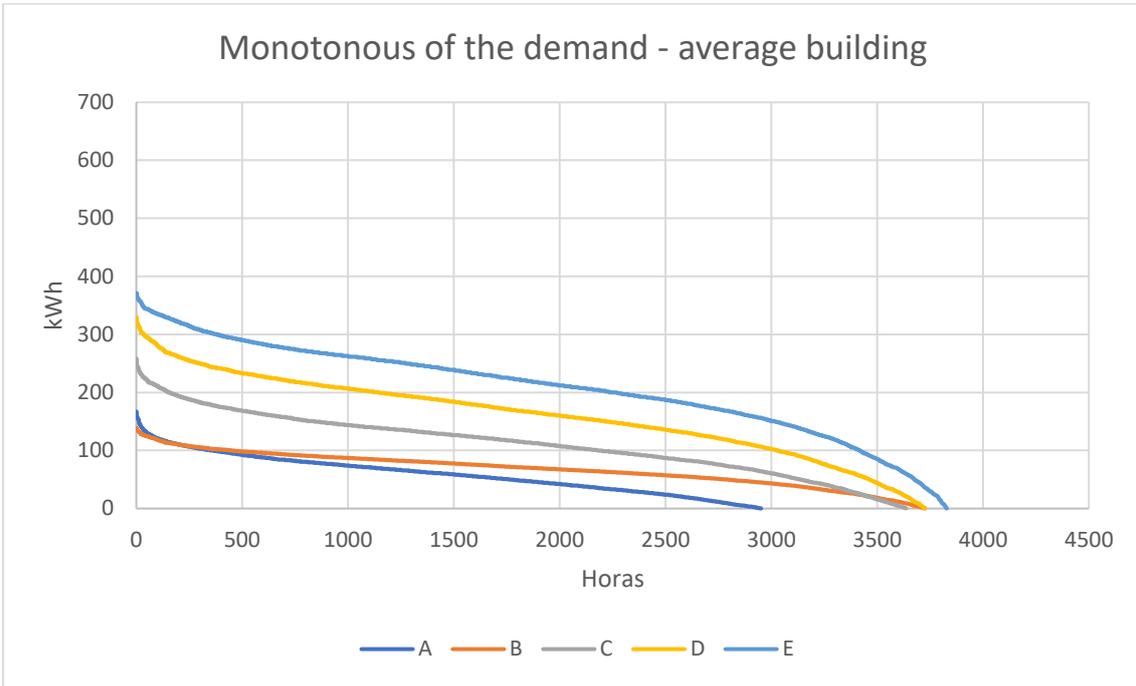
To develop the project it will be necessary to obtain the thermal demand for different climatic zones. To do this, we will use both: a series of equations that have been developed for the calculation of thermal demand and also the MET files that contain the meteorological information necessary to obtain this demand.

The equations governing the operation of heat pumps powered by natural gas will be obtained by linear regressions. This will be essential when designing the facilities and to obtain the necessary information for subsequent analysis.

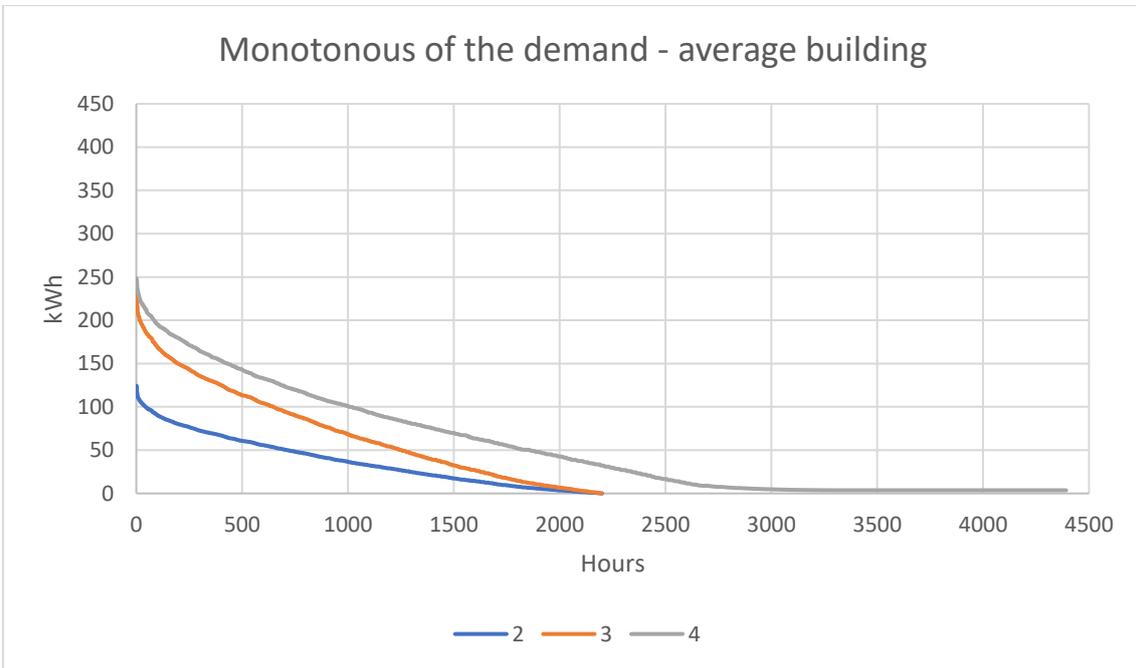
Finally, economic analyses will be carried out for all the situations studied, and the results will be compared to those of other energy sources. In addition, the need to improve the thermal insulation of the building if the primary energy requirements cannot be met will be studied.

## **Results**

The hourly thermal demand for each of the climatic zones present in Spain has been determined. With this information and to understand the behavior of the demand the monotonous curve of the demand for thermal energy has been represented according to the climatic zone and the season (Figure 1 and 2).

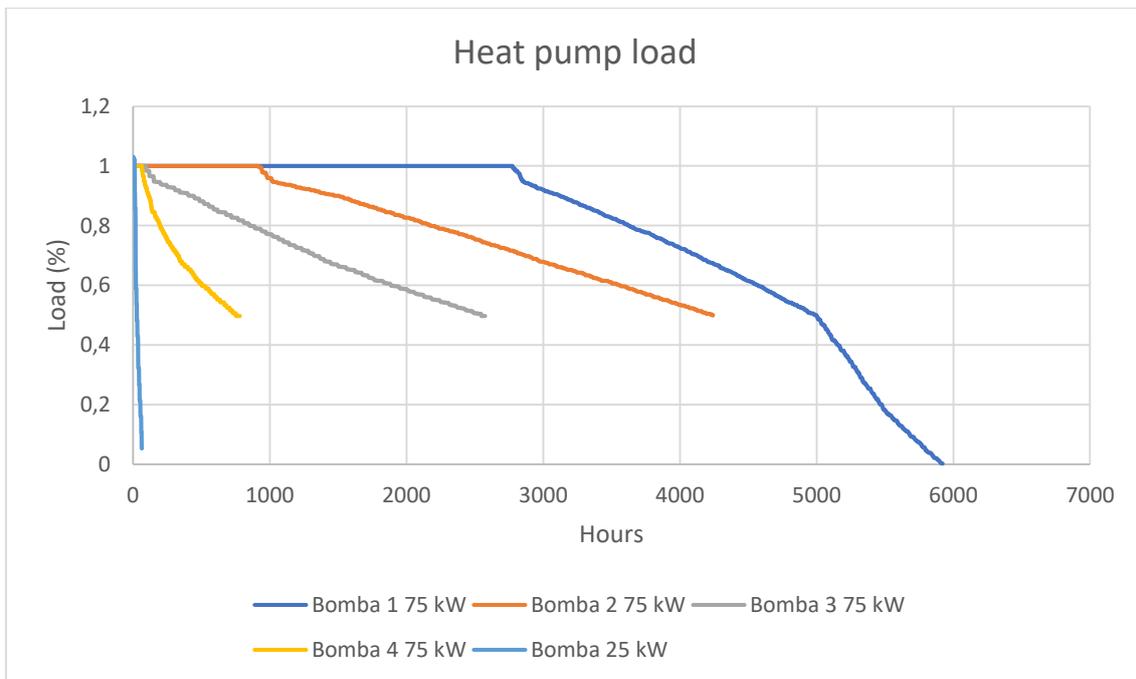


*Review Figure 1: Monotonous of the thermal demand in the winter months for a 6.000 m<sup>2</sup> building with average thermal isolation.*



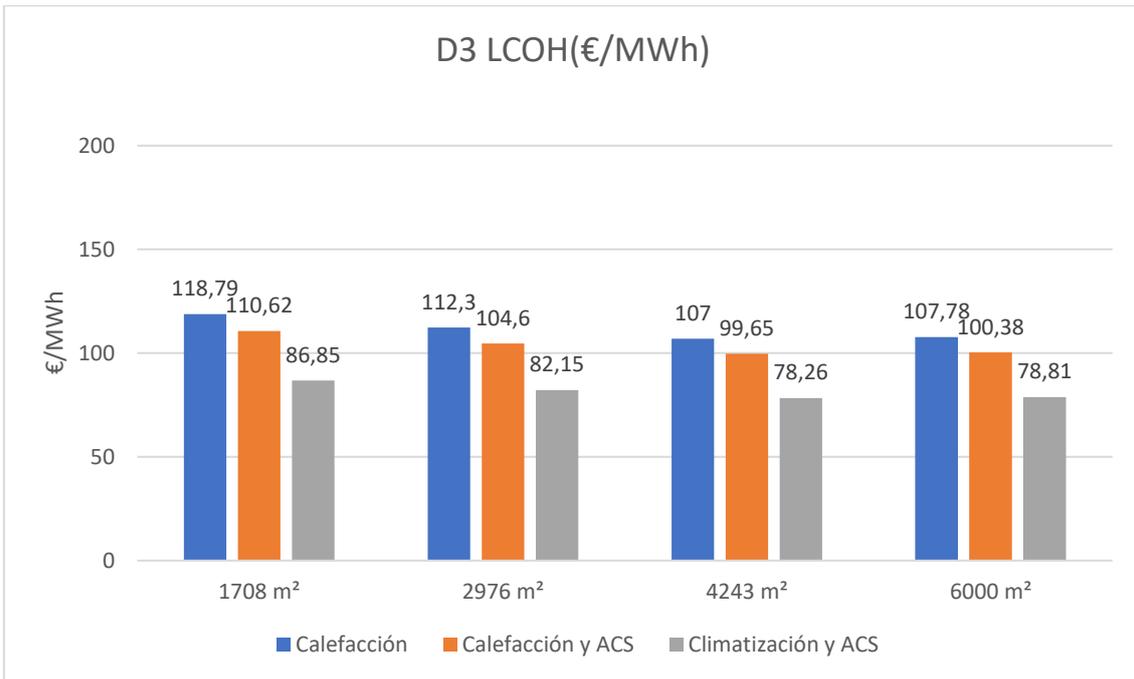
*Review Figure 2: Monotonous of the thermal demand in the summer months for a 6.000 m<sup>2</sup> building with average thermal isolation.*

On the other hand, we have been able to determine the behavior of heat pumps in the different conditions they will have to deal with. In Figure 3 we can see the monotonous curve of the degree of load at which the pumps work in a building of 6,000 m<sup>2</sup> in a climate zone D3.



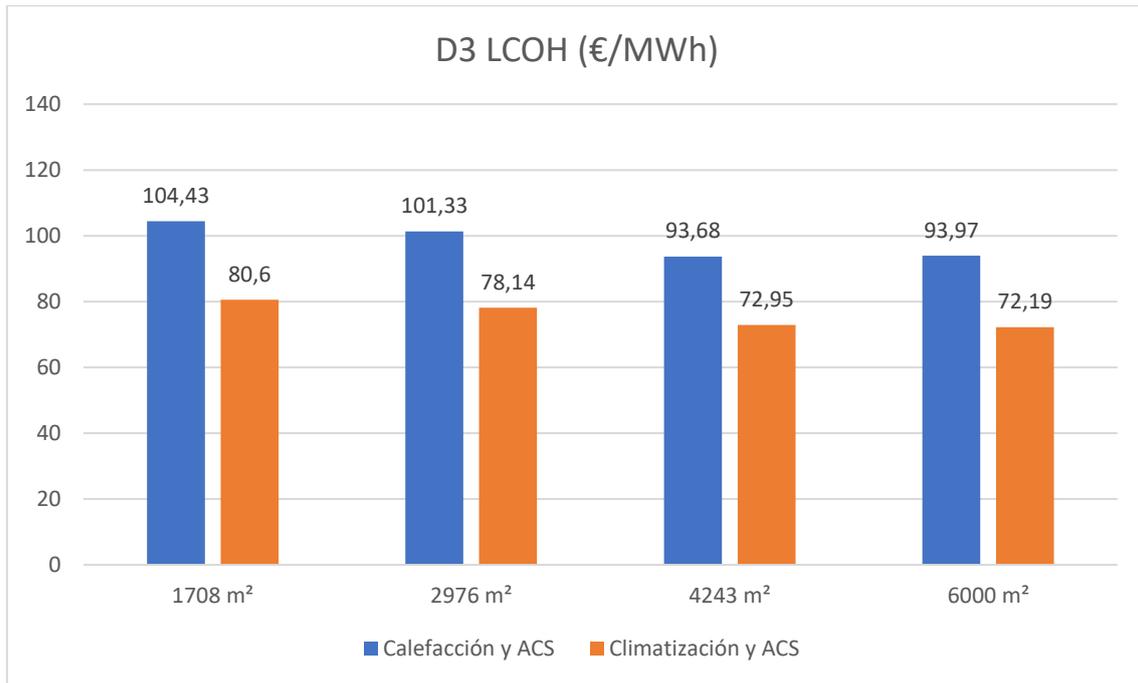
*Review Figure 3: Monotonous of the degree load of the heat pumps in a 6.000 m<sup>2</sup> building in a D3 climatic zone.*

With all this an economic analysis has been carried out, in which taking into account all the expected expenses during the life of the project, the levelized energy costs have been calculated (Figure 4).



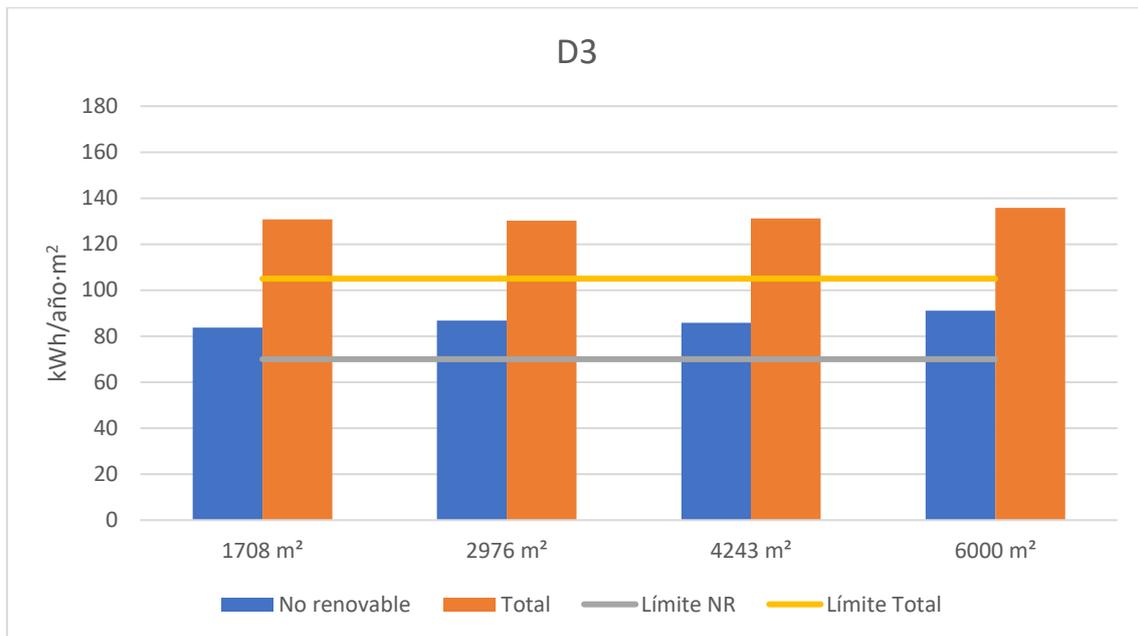
*Review Figure 4: LCOH for a building in a D· climatic zone.*

As it can be seen in Figure 4 the incorporation of the domestic hot water significantly reduces the cost of energy, this is because the heat generated by the engine is not being “thrown away” into the environment. But the heat generated by the engine is such that once the domestic hot water needs of the building itself are covered, it is also possible to supply domestic hot water to another building. If this possibility is incorporated in the economic analysis the following LCOH values are obtained (Figure 5).



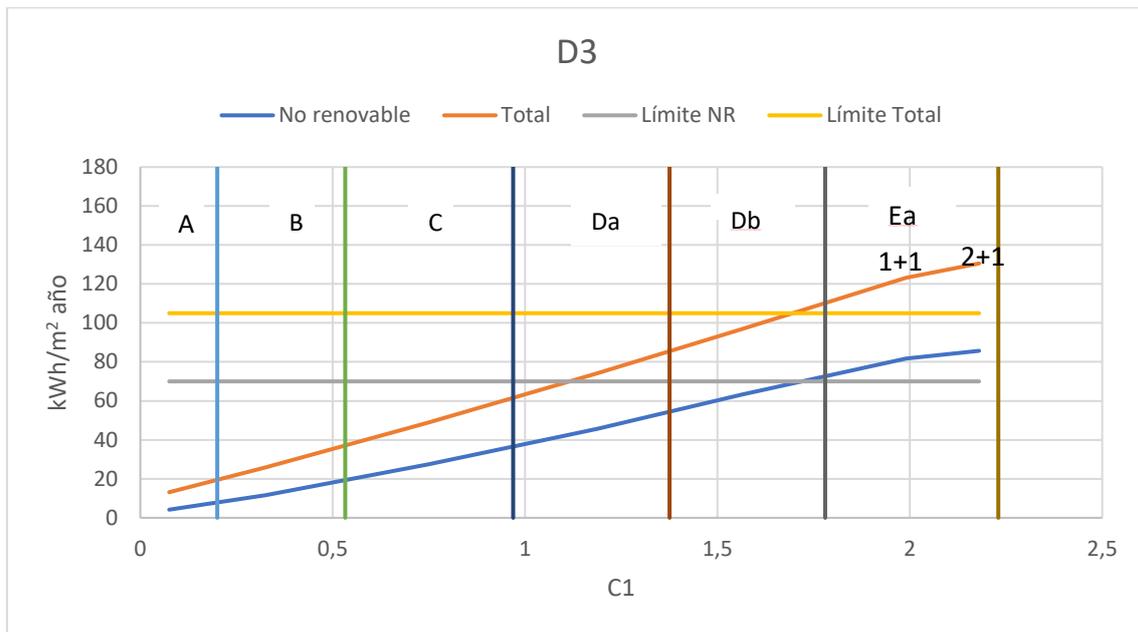
*Review Figure 5: LCOH considering all the heat from the engine is used in a building in a D3 climatic zone.*

As it can be seen in Figure 5, increasing the energy consumption of the available energy significantly reduces the levelized cost of energy, until almost reaching the cost of the cheapest energy source, the central boiler (73.54 €/MWh). Once the economic calculation is made, the primary energy consumption of the system is obtained to see if the requirements set by the technical code are met.



*Review Figure 6: Primary energy consumption in a building located in a D3 climatic zone.*

As it can be seen in Figure 6, the maximum limits for the consumption of renewable and total primary energy are exceeded. Since these limits are set in the framework of a reform it will be necessary to improve the heat insulation of the building. To determine the necessary change in energy rating, a graph is obtained in which the effects of thermal insulation on the primary energy for certain thermal insulation values are seen.



Review Figure 7: Effects of thermal isolation in primary energy consumption in a building located in a D3 climatic zone.

As it can be seen in Figure 7, a slight improvement in the energy rating is required to satisfy the restrictions on primary energy consumption set by the technical code.

Unfortunately, although the heat for domestic hot water comes from the thermal engine, this is not renewable, so the minimal renewable energy coverage required by Building Technical Code is not complied. Even if natural gas is replaced by biomethane, not locally generated, this restriction is not complied. This aspect is an important issue of the current regulation.

## Conclusions

The results obtained in this project show that the aerothermal heat pump powered by natural gas is a viable solution for the fight against energy poverty. It is a solution that can cover all the thermal needs of a block of flats with a cost of energy similar to that of a central boiler. In addition, the technology is quite attractive from an environmental point of view as it is able to provide more useful heat than that provided by the combustion of natural gas.

It is necessary to consider that, in order to meet the requirements of primary energy consumption, it may be necessary to carry out an express reform to improve the energy rating of the building. Unfortunately, current conditions about use of renewable energies for domestic hot water are not met.

## ÍNDICE

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | INTRODUCCIÓN .....   | 6  |
| 1.1   | Paliar la pobreza energética .....   | 7  |
| 1.2   | Mitigar los efectos de la actividad humana sobre el medio ambiente .....           | 10 |
| 2     | ESTADO DEL ARTE .....  | 11 |
| 2.1   | Sistemas basados en caldera.....   | 11 |
| 2.1.1 | Calderas de gas natural .....  | 11 |
| 2.1.2 | Calderas de GLP .....  | 13 |
| 2.1.3 | Calderas de gasóleo.....   | 13 |
| 2.1.4 | Calderas de biomasa .....  | 13 |
| 2.2   | Sistemas basados en bombas de calor.....   | 14 |
| 2.2.1 | Bomba de calor accionada con motor de gas natural.....                             | 16 |
| 2.2.2 | Bomba de calor geotérmica .....  | 17 |
| 2.3   | Redes de distrito .....  | 18 |
| 3     | METODOLOGÍA.....   | 19 |
| 3.1   | Modelo de la demanda térmica .....   | 19 |
| 3.2   | Caracterización de las bombas de calor aerotérmicas accionadas por gas natural.... | 30 |
| 3.2.1 | Bomba de 75 kW .....   | 34 |
| 3.2.2 | Bomba de 25 kW .....   | 38 |
| 3.3   | Modelo económico .....   | 45 |
| 3.4   | Agua Caliente Sanitaria .....  | 49 |
| 3.5   | Energía primaria .....   | 52 |
| 4     | RESULTADOS .....   | 55 |
| 5     | CONCLUSIONES .....   | 68 |
| 6     | BIBLIOGRAFÍA .....   | 70 |
| 7     | Anexo 1 Objetivos de desarrollo sostenible de Naciones Unidas .....                | 73 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Porcentaje de españoles afectados por los distintos tipos de pobreza energética.....     | 8  |
| Tabla 2: Coeficientes de correlación de la severidad climática.....                               | 22 |
| Tabla 3: Valores de alpha y beta para invierno. ....  | 22 |
| Tabla 4: Valores de alpha y beta para verano. ....  | 22 |
| Tabla 5: Valores de referencia de la demanda térmica según la zona climática. ....                | 23 |
| Tabla 6: Valores de R para el cálculo de la demanda de calefacción.....                           | 24 |
| Tabla 7: Valores de R para el cálculo de la demanda de refrigeración. ....                        | 25 |
| Tabla 8: Valores de C1 según la zona climática de invierno y la antigüedad del edificio.<br>..... | 25 |
| Tabla 9: Características de trabajo de la bomba de calor de 75 kW.....                            | 32 |
| Tabla 10: Características de trabajo de la bomba de calor de 25 kW.....                           | 34 |
| Tabla 11: Valores de la regresión para el calor proporcionado 75 kW. ....                         | 34 |
| Tabla 12: Valores estadísticos de la regresión para el calor proporcionado 75 kW.....             | 35 |
| Tabla 13: Valores de la regresión para el consumo 75 kW. ....                                     | 36 |
| Tabla 14: Valores estadísticos de la regresión para el consumo 75 kW.....                         | 36 |
| Tabla 15: Valores de la regresión para el ACS 75 kW.....  | 37 |
| Tabla 16: Valores estadísticos de la regresión para el ACS 75 kW.....                             | 37 |
| Tabla 17: Valores de la regresión para la potencia entregada 25 kW. ....                          | 39 |
| Tabla 18: Valores estadísticos de la regresión para el calor entregado 25 kW.....                 | 39 |
| Tabla 19: Valores de la regresión para el consumo de gas 25 kW.....                               | 40 |
| Tabla 20: Valores estadísticos de la regresión para el consumo 25 kW.....                         | 40 |
| Tabla 21: Valores de la regresión para el ACS 25 kW.....  | 41 |
| Tabla 22: Valores estadísticos de la regresión para el ACS 25 kW.....                             | 42 |
| Tabla 23: Tarifa de gas 3.4 de Endesa. ....   | 47 |
| Tabla 24: Tarifa de gas 3.4 de Endesa con impuestos.....  | 47 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 25: Temperaturas del agua de red.....   | 51 |
| Tabla 26: Valores para el cálculo de la demanda de ACS.....   | 51 |
| Tabla 27: Tabla con los factores de emisión para los distintos combustibles. ....                       | 52 |
| Tabla 28: Tabla con los factores de conversión de energía final a primaria. ....                        | 53 |
| Tabla 29: Límites de consumo de energía primaria no renovable según la zona<br>climática[CTE2009] ..... | 54 |
| Tabla 30: Límites de consumo de energía primaria total según la zona<br>climatológica[CTE2009].....     | 54 |
| Tabla 31: Tabla con los valores de C1 según la calificación energética .....                            | 65 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 : Visión esquemática de la instalación del suelo radiante.....                              | 12 |
| Figura 2: Combustible de caldera de biomasa. ....  | 14 |
| Figura 3: Esquema del funcionamiento de la bomba de calor reversible. [LINAR16]....                  | 15 |
| Figura 4: Esquema de una bomba de calor accionada con motor de gas natural. ....                     | 17 |
| Figura 5: Monótona de la demanda térmica en invierno para edificios con aislamiento medio.....       | 26 |
| Figura 6: Monótona de la demanda térmica en verano para edificios con aislamiento medio.....         | 27 |
| Figura 7: Monótona de la demanda en invierno para edificios con aislamiento deficiente.....          | 28 |
| Figura 8: Monótona de la demanda térmica en verano para edificios con aislamiento deficiente.....    | 28 |
| Figura 9: Monótona de la demanda térmica en invierno para edificios con aislamiento moderno. ....    | 29 |
| Figura 10: Monótona de la demanda térmica en verano para edificios con aislamiento moderno. ....     | 29 |
| Figura 11: Comportamiento de la potencia entregada en función de la temperatura exterior 75 kW. .... | 35 |
| Figura 12: Comportamiento del consumo en función de la temperatura exterior. ....                    | 36 |
| Figura 13: Potencia de ACS en función de la temperatura exterior.....                                | 38 |
| Figura 14: Potencia de climatización en función de la temperatura exterior.....                      | 39 |
| Figura 15: Potencia consumida según la temperatura exterior.....                                     | 41 |
| Figura 16: Potencia de ACS en función de la temperatura exterior.....                                | 42 |
| Figura 17: Gráfico explicativo del sistema de encendido de las bombas.....                           | 44 |
| Figura 18: Monótona del grado de carga de las bombas.....  | 45 |
| Figura 19: Tanques de almacenamiento de ACS. ....  | 50 |

---

|  |    |
|--|----|
| Figura 20: LCOH zona D3 solamente calefacción. ....  | 56 |
| Figura 21: LCOH zona A4 solo calefacción.....  | 56 |
| Figura 22: LCOH zona E1 solo calefacción. ....   | 57 |
| Figura 23: LCOH zona D3 con ACS. ....  | 58 |
| Figura 24: LCOH zona A4 con ACS. ....  | 58 |
| Figura 25: LCOH zona E1 con ACS.....   | 59 |
| Figura 26: LCOH zona D3 con ACS y aprovechando toda la energía del motor. ....   | 60 |
| Figura 27: LCOH zona A4 con ACS y aprovechando toda la energía del motor. ....   | 60 |
| Figura 28: LCOH zona E1 con ACS y aprovechando toda la energía del motor.....  | 61 |
| Figura 29: Relación entre el aislamiento (C1), el área climatizada y el LCOH por m2 para un LCOH de 78,25€/MWh y 3 bombas de 75 kW y una de 25 kW..... | 62 |
| Figura 30: Consumo de energía primaria en la zona D3. ....   | 63 |
| Figura 31: Consumo de energía primaria en la zona A4.....  | 63 |
| Figura 32: Consumo de energía primaria en la zona E1.....  | 64 |
| Figura 33: Variación del consumo de energía primaria según los valores de C1 en la zona D3. ....   | 65 |
| Figura 34: Variación del consumo de energía primaria según los valores de C1 zona A4 configuración 75 kW + 25 kW.....                                  | 66 |
| Figura 35: Variación del consumo de energía primaria según los valores de C1 en la zona E1.....  | 66 |

# 1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto pretende evaluar la viabilidad técnica y económica de las bombas de calor aerotérmicas accionadas por un motor de gas natural. En concreto, el estudio se centra en el análisis de la utilidad de estas bombas para la climatización de viviendas en bloque en distintas zonas climáticas de España.

Son varias las consideraciones previas que impactan en el planteamiento del proyecto. Por un lado, está el marco global, con dos grandes objetivos:

- Paliar la pobreza energética.
- Mitigar los efectos de la actividad humana sobre el medio ambiente.

Por otro lado, las consideraciones propias del proyecto técnico:

- Identificar la demanda térmica en las distintas zonas climáticas de España, para distintos tipos de viviendas.
- Cuantificar cómo afectan las distintas variables (temperatura exterior, grado de carga) al rendimiento exigido a una bomba (calor proporcionado y consumo de gas). Para ello se realizará el modelado de las bombas de calor aerotérmicas accionadas por gas, que ayudará a comprender el funcionamiento que tienen, y se diseñará el sistema por el cual se activarán las bombas.
- Identificar los efectos que tiene el aislamiento térmico en la demanda de energía térmica y en el dimensionamiento de la instalación requerida, de cara al cumplimiento de las normativas edificatorias.

Los resultados del ejercicio permitirán analizar la viabilidad de este sistema de climatización desde el punto de vista económico (coste normalizado del calor) y técnico (cantidad de energía primaria consumida). Los resultados también llevarán a proponer la utilización de otras formas de calor que pueden suponer una utilidad adicional para el usuario, contribuyendo a un mayor aprovechamiento energético, permitiendo así comparar esta forma de climatización con otras.

Al plantearse el proyecto como una posible reforma de un bloque de edificios se plantea que la bomba de calor aerotérmica funcione en un sistema aire/agua haciendo uso de los radiadores de baja temperatura como los intercambiadores de calor en las viviendas. La viabilidad de este planteamiento se basa en que los radiadores generalmente están sobredimensionados lo que permite que transmitan el calor requerido, aunque la temperatura del agua respecto del ambiente se reduzca.

## **1.1 Paliar la pobreza energética**

La pobreza energética se define como “la situación en la que un hogar es incapaz de pagar una cantidad de energía suficiente para la satisfacción de sus necesidades domésticas y/o cuando se ve obligado a destinar una parte excesiva de sus ingresos a pagar la factura energética de su vivienda ya sea debido a una falta de ingresos mínimos o por vivir en una vivienda ineficiente energéticamente”. [AMBI21]

Los indicadores con los que cuenta el Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico para identificar qué personas pudieran sufrir esta pobreza energética son los siguientes:

- **Gasto desproporcionado:** porcentaje de hogares cuyo gasto en energía en comparación con sus ingresos es más del doble del gasto medio nacional.
- **Pobreza energética escondida:** es el porcentaje de los hogares en los que el gasto en energía global es inferior a la mitad de la mediana del gasto en energía en los hogares.
- **Incapacidad para mantener la vivienda a una temperatura adecuada:** porcentaje de la población que no puede permitirse tener su vivienda a una temperatura confortable.
- **Retraso en el pago de las facturas:** porcentaje de la población que tiene problemas a la hora de mantenerse al día en los pagos de los distintos suministros energéticos de su hogar.

Para poder poner en escala cómo de relevante es este problema, la Tabla 1 muestra las cifras del Ministerio sobre la situación de la pobreza energética en España. Como se puede ver, los porcentajes de población afectados por este problema no son especialmente bajos. A pesar de que en los últimos años se manifiesta una contención o incluso reducción en los indicadores en general, sí ha habido un incremento en el número de personas para las cuales el gasto energético es demasiado alto en relación a sus ingresos.

| Indicador (% población)                                  | 2008 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>Gasto desproporcionado</b>                            | 15,9 | 16,6 | 16,6 | 16,7 | 17,3 | 16,9 | 16,7 |
| <b>Pobreza energética escondida</b>                      | 14,6 | 13,2 | 12,2 | 12,6 | 11,5 | 11,0 | 10,6 |
| <b>Temperatura inadecuada de la vivienda en invierno</b> | 5,9  | 11,1 | 10,6 | 10,1 | 8,0  | 9,1  | 7,6  |
| <b>Retraso en el pago de facturas</b>                    | 4,6  | 9,2  | 8,8  | 7,8  | 7,4  | 7,2  | 6,6  |

*Tabla 1: Porcentaje de españoles afectados por los distintos tipos de pobreza energética.*

Para afrontar este problema en abril de 2019 el gobierno español aprobó la Estrategia Nacional contra la Pobreza Energética 2019-2024. El objetivo fijado en el documento es el de reducir las cifras de pobreza energética como mínimo en un 25% para el año 2025, siendo la meta fijada en ese mismo documento es la de alcanzar una disminución del 50% de afectados, también para ese mismo año. [TRAN19]

Las medidas contempladas para la consecución del objetivo son las siguientes:

- **Profundizar en el conocimiento sobre la pobreza energética.** Se propone mejorar el conocimiento existente por parte de las instituciones sobre el consumo energético de los consumidores y relacionarlo con las condiciones climáticas.
- **Implementación de un nuevo bono social energético.** La actual complicación de coordinar dos bonos sociales (térmico y eléctrico) impulsa la creación de un único bono social energético que englobe las distintas fuentes de suministro, simplifique su concesión y facilite la coordinación entre administraciones públicas.
- **Restricciones al corte de suministro.** Se prohíbe el corte de cualquier suministro energético en situaciones climatológicas extremas. En caso de impago, el cliente tiene derecho a un suministro mínimo vital durante un periodo de cuatro meses antes de que se le corten los suministros.
- **Rehabilitación.** Se fomentarán las rehabilitaciones de los edificios para incrementar su eficiencia energética mediante rehabilitaciones tanto expresas como integrales. También se incentivará la sustitución de electrodomésticos obsoletos por otros más eficientes.
- **Protección de los consumidores y conciencia social.** Se creará un protocolo de actuación para detectar personas que se puedan encontrar en una situación de vulnerabilidad y se fomentará la conciencia social sobre la pobreza energética.

## 1.2 Mitigar los efectos de la actividad humana sobre el medio ambiente

Los esfuerzos del gobierno para reducir la pobreza energética se engloban en una política de transición energética con un gran apoyo tanto social como institucional. La transición energética se puede definir como el cambio del sistema energético, radicado en los combustibles fósiles, a uno de bajas emisiones o sin emisiones de carbono, basado en las fuentes de energía renovables (y eventualmente en nuclear). La necesidad de esta transición energética viene dada por la necesidad de reducir los efectos del cambio climático. [ENEL21]

Hay un compromiso a nivel de la Unión Europea de reducir el impacto de nuestra actividad en el medio ambiente. Los últimos objetivos en materia medioambiental que ratificó la Unión Europea en 2021 son los siguientes:

- Un objetivo vinculante para la UE en 2030 de, al menos, un **55%** menos de **emisiones** de gases de efecto invernadero en comparación con 1990.
- Un objetivo vinculante para la UE en 2030 de, al menos, un **32%** de **energías renovables** en el consumo de energía.
- Un objetivo indicativo para la UE en 2030 de, al menos, un **32,5%** de mejora de la **eficiencia energética**.
- La consecución urgente, a más tardar en 2020, del actual objetivo de **interconexiones de electricidad** del **10%**, en particular para los países bálticos y la península ibérica, y del objetivo de alcanzar el **15%** desde la fecha en la que se firmó el acuerdo a 2030. [TRAN21]

## **2 ESTADO DEL ARTE**

En esta sección se expondrá un estudio de las distintas soluciones disponibles en el mercado de la climatización, concretamente para el sector residencial. Se realizará una breve explicación del funcionamiento del sistema de climatización de cada una de ellas y de sus principales ventajas y desventajas. Se clasificarán en función del método que se utilice para obtener la energía y del combustible utilizado.

### **2.1 Sistemas basados en caldera**

Es el sistema más habitual de calefacción para el uso residencial. Existen varios tipos dependiendo del combustible y del modo en el que sucede la combustión, pero todos ellos están basados en el mismo principio: en la quema de un combustible para generar calor.

#### **2.1.1 Calderas de gas natural**

##### **2.1.1.1 Calderas de gas natural de baja temperatura**

La caldera de gas natural de baja temperatura funciona de la misma forma que una caldera como se ha descrito arriba, lo único que la diferencia del resto es que opera a unas temperaturas inferiores, entre 35°C y 45°C. Las calderas de baja temperatura son capaces de regular su temperatura en función de la demanda energética real.

Tienen rendimientos muy altos, pudiendo llegar hasta el 95%, esto supone que se puedan alcanzar ahorros de hasta el 25% con respecto a una caldera convencional, aunque su precio suele ser superior. Puede ser utilizado tanto para viviendas unifamiliares como para bloques de viviendas. [NATU21]

Los sistemas de distribución del calor generado que se pueden utilizar son:

- **Radiadores:** intercambiadores de calor que transmiten el calor del agua a la habitación a calentar.
- **Suelo radiante:** sistema de tubos colocados debajo del suelo que transportan el calor a las distintas habitaciones.



*Figura 1 : Visión esquemática de la instalación del suelo radiante.*

### **2.1.1.2 Calderas de gas natural de condensación**

La caldera de condensación es una caldera donde el vapor de agua de los gases de escape se condensa para aprovechar así su calor latente y generar más calor útil. Gracias al aprovechamiento de la condensación, estas calderas son capaces de ahorrar hasta un 35% del consumo de gas de una caldera convencional. Su rendimiento suele ser cercano al 100% con respecto a su poder calorífico superior, calor obtenido cuando condensan la casi totalidad de los gases de la combustión. [ARNA16]

Las calderas de condensación pueden ser utilizadas en sistemas centralizados o en sistemas unifamiliares.

### **2.1.2 Calderas de GLP**

Son calderas que utilizan como combustible Gas Licuado de Petróleo (butano, propano o una mezcla de ambos). Estos gases presentan una gran ventaja logística: a temperatura ambiente su presión de saturación es razonable lo que permite almacenarlos en estado de vapor húmedo, aumentando la densidad energética.

[LINA16]

El gran inconveniente del GLP es que requiere tener un sistema de almacenamiento ya que no se transporta en forma canalizada. Las principales formas de comercializarlo son envasado (en bombonas) o a granel (usando camiones cisterna).

### **2.1.3 Calderas de gasóleo**

Es el sistema de calefacción tradicional. Actualmente se utilizan en zonas donde el suministro de gas no es posible debido que no se tiene acceso a la red de distribución al no haber ninguna comercializadora que llegue a la vivienda. Al no poder tener un suministro continuo se requiere de la instalación de un tanque para almacenar el combustible. Sus principales desventajas son la menor eficiencia respecto a las calderas de gas y mayor contaminación.

### **2.1.4 Calderas de biomasa**

Es un tipo de caldera que utiliza como combustible desechos orgánicos. Los combustibles de biomasa más habituales son de pellets, leña, huesos de aceituna y de cascara de frutos secos. Al utilizar combustible orgánico se consideran renovables, ya que el dióxido de carbono generado por la combustión ha sido previamente capturado para producir el combustible (en este caso habría sido previamente capturado por las plantas en la fotosíntesis).



*Figura 2: Combustible de caldera de biomasa.*

A pesar de ser una opción interesante desde el punto de vista medioambiental también tiene ciertas desventajas. Requiere disponer de un lugar para almacenar el combustible y realizar una planificación para el abastecimiento del combustible, es necesario recoger las cenizas y su eficiencia está por debajo de una caldera de gas.

## **2.2 Sistemas basados en bombas de calor**

De acuerdo con la Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización “la bomba de calor es una máquina térmica que consigue la temperatura perfecta en cualquier tipo de local o recinto, tanto en invierno, como en verano y pudiendo también producir agua caliente de una forma sencilla, económica y respetuosa con el medio ambiente”. La bomba de calor hace uso de un ciclo termodinámico inverso para producir más calor útil de trabajo consumido, tomando la diferencia de un foco frío. Aunque este equipo suele ser usado principalmente para calentar las casas también puede usarse para refrigerarlas si disponen de una válvula de cuatro vías. [AFEC21] [ARNA15]

Las bombas de calor constan de un circuito cerrado que contiene un fluido refrigerante que se hace circular por ciertos componentes que facilitan la transmisión de calor en la dirección deseada. Los componentes principales del sistema son los siguientes:

- **Compresor:** aumenta la temperatura y la presión del vapor refrigerante. Este incremento de temperatura es el que facilita que el sistema pueda tomar calor de un fluido frío para transmitirlo a uno caliente.
- **Condensador:** es un intercambiador de calor en el cual el fluido refrigerante pasa de vapor a líquido cediendo calor al fluido caliente.
- **Válvula de expansión:** en la válvula el refrigerante pierde presión y se enfría por debajo de la temperatura del fluido frío, saliendo de la misma como vapor húmedo, con bajo título.
- **Evaporador:** intercambiador de calor en el cual el refrigerante es calentado y pasa a estado gaseoso.

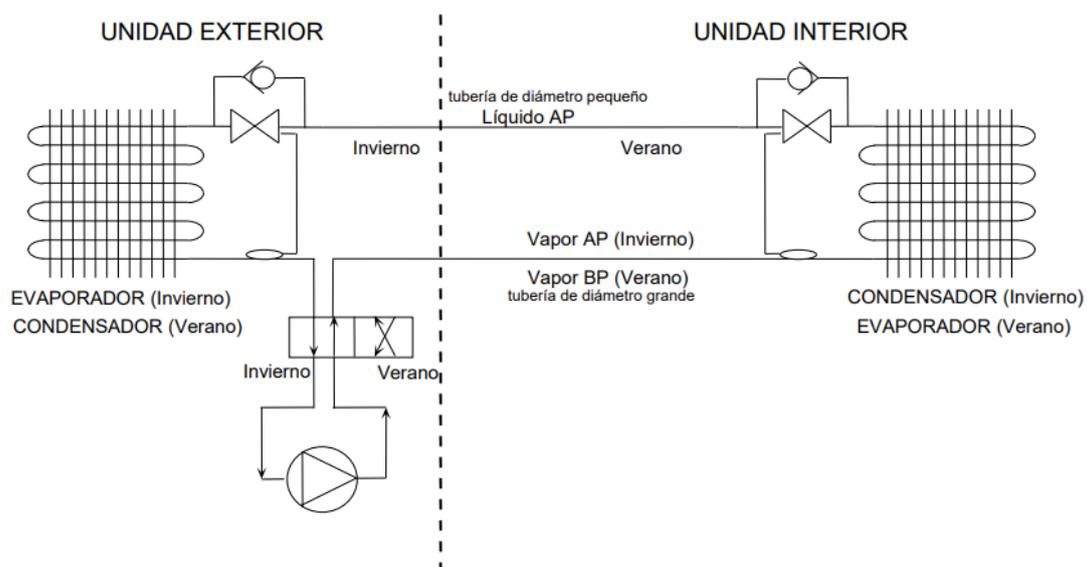


Figura 3: Esquema del funcionamiento de la bomba de calor reversible. [LINA16]

### **2.2.1 Bomba de calor accionada con motor de gas natural**

Las bombas de calor aerotérmicas presentan el inconveniente de que en invierno sufren una gran pérdida de potencia, que suele obligar a dotarlas de una resistencia eléctrica que penaliza su consideración como energía renovable. Para resolver este problema se plantea la posibilidad de utilizar un motor térmico accionado por gas natural. Utilizar el motor térmico permite utilizar el calor que genera como calentador auxiliar o para producir agua caliente sanitaria. Su bajo consumo eléctrico la convierte en una buena opción para utilizarse en lugares con una conexión poco estable. Su principal desventaja es que es una tecnología menos desarrollada que la bomba de calor accionada eléctricamente, por lo que la cantidad de modelos disponibles es mucho menor.

[LINA16]

El uso del motor térmico garantiza un mayor rendimiento a temperaturas bajas, pero tiene un COP inferior que el que se obtendría con un motor eléctrico (aunque para hacer una comparación justa sería preciso hallar el COP de la segunda respecto a la energía primaria para producir la energía eléctrica). La Figura 4 muestra un esquema de una bomba de calor accionada mediante gas natural que genera agua caliente sanitaria.

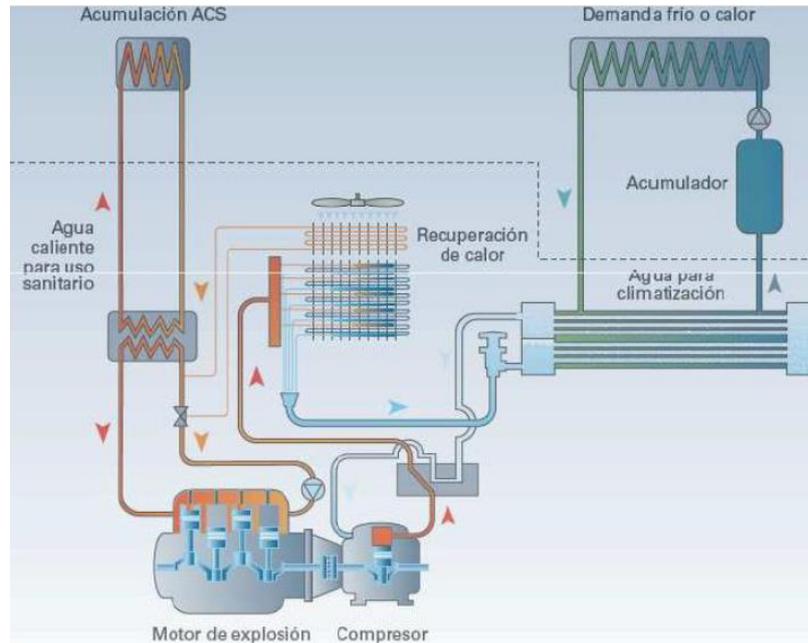


Figura 4: Esquema de una bomba de calor accionada con motor de gas natural.

### 2.2.2 Bomba de calor geotérmica

La bomba de calor geotérmica emplea el terreno como fuente térmica y la principal ventaja es que su temperatura es mucho más estable que la del aire ambiente. La bomba geotérmica es un sistema agua/agua donde el agua del intercambiador que no produce el efecto útil (evaporador en invierno y condensador en verano) actúa como medio de transporte entre el refrigerante del ciclo inverso y el terreno. Estas bombas están dotadas de un intercambiador adicional que intercambia calor con el terreno. [LINA16]

Aunque los costes de operación del sistema son relativamente bajos debido a la alta eficiencia del sistema, la instalación es muy compleja lo que hace que la inversión sea bastante superior a otros sistemas de bomba de calor.

## 2.3 Redes de distrito

Las redes de distribución son sistemas de distribución que conectan las fuentes de energía con los consumidores. El objetivo de este sistema de climatización es centralizar la generación de calor, frío o agua caliente sanitaria de tal forma que se pueda usar equipos más eficientes que disminuyan el consumo. El origen de la energía puede ser muy distinto (renovable, bombas de calor, gas natural...), y en ocasiones combinándose con la producción eléctrica. [ARNA21] [IDAE21]

Este sistema de distribución de energía térmica presenta el reto de poder garantizar que cada edificio conectado a la red pueda recibir la potencia demanda independientemente del grado de carga al que opere el generador. Este tipo de instalaciones son más comunes en grandes ciudades donde los rascacielos no tienen espacio para albergar la sala de máquinas requerida para suministrar la energía térmica que demandan.

## 3 METODOLOGÍA

En este capítulo será presentada la metodología que se ha utilizado durante el análisis sobre la viabilidad tanto técnica como económica del uso de bombas de calor accionadas mediante gas natural.

### 3.1 Modelo de la demanda térmica

Para poder realizar el estudio se debe primero calcular la demanda energética que habrán de suministrar las bombas de calor. Para poder calcular la demanda térmica se utilizará la información meteorológica proporcionada por el CTE en una serie de archivos MET, que incluyen información sobre distintas variables meteorológicas para unas determinadas zonas teniendo en cuenta la severidad de los inviernos y la de los veranos. Es importante remarcar que para este estudio sólo se consideran dos estaciones, cada una abarcando seis meses, siendo el invierno el periodo comprendido entre octubre y marzo y verano los meses comprendidos entre abril y septiembre. Esto será importante en los distintos casos estudiados ya que, en los seis meses considerados de verano, se tomará la demanda térmica como demanda de aire acondicionado y la demanda de invierno como demanda de calefacción.

Los archivos MET incluyen la información necesaria para caracterizar un clima. Las variables que incluye son:

- **Fecha de los datos:** el archivo incluye información de cada hora del año, esto permite conocer mejor la demanda y tener en cuenta distintas variables que pueden afectar según el momento del día.
- **Temperatura seca (°C):** conocer la temperatura exterior es imprescindible para conocer la demanda térmica requerida por el edificio.

- **Radiación (W/m<sup>2</sup>):** la radiación, al ser un aporte energético extra, puede alterar la demanda energética requerida. La información aportada por los archivos MET hace referencia a la irradiancia solar sobre plano horizontal, la cual se obtiene mediante la suma de las irradiaciones tanto directas como difusas sobre un plano horizontal.
- **Humedad relativa:** aunque no será relevante durante este estudio ya que la bomba de calor solo modificará las condiciones de temperatura es una variable importante a la hora de determinar la sensación térmica.
- **Velocidad y dirección del viento:** aunque el viento puede facilitar la transmisión de calor mediante convección, en el modelo utilizado esta componente será despreciada.

Para el cálculo de la demanda térmica se considera como caso base un bloque de edificios de 6.000 m<sup>2</sup> y con un aislamiento térmico medio, considerando que el edificio fue construido entre los años 1981 y 2007.

Para calcular la demanda térmica de un bloque de edificios se utilizan las siguientes formulas por orden de cálculo:

$$\Delta T_k = \begin{cases} T_b - T_k & \text{si } T_b > T_k \\ 0 & \end{cases}$$

$$\Delta T_k = \begin{cases} T_k - T_b & \text{si } T_k > T_b \\ 0 & \end{cases}$$

Con esta primera ecuación se calcula la diferencia de temperatura entre la temperatura ambiente ( $T_k$ ) y la temperatura deseada en el bloque de edificios (temperatura base,  $T_b$ ). La primera de las ecuaciones es para cuando se calcule la demanda para los meses de invierno mientras que la segunda es para los meses de verano. La temperatura que ha sido fijada como temperatura base son  $20^\circ\text{C}$ , que se encuentra en el rango de  $20\text{-}23^\circ\text{C}$  considerados como confortables. A continuación, se aplica la siguiente fórmula:

$$GD_0 = \frac{\sum_{k=1}^{24 \cdot N_d} \Delta T_k}{24 \cdot N_m}$$

En esta fórmula se suman las diferencias de temperatura entre el exterior y la temperatura base, agrupándolas según la estación (invierno o verano), dividiéndolas entre 24 (número de horas en el día) por el número de meses, obteniendo así lo que se conoce como “grados-día”. Pese a considerar que sólo existen dos estaciones (verano e invierno) de seis meses cada una, las fórmulas que se utilizarán en los próximos pasos están optimizadas para un invierno de tres meses y un verano de cuatro meses, por ello en este paso se introducirá una duración de tres meses en el caso del invierno y cuatro meses en el verano. Esto será corregido para pasar a estaciones de seis meses, como será explicado más adelante:

$$RAD_0 = \frac{\sum_{k=1}^{24 \cdot N_d} r_k}{N_m}$$

Como se ha mencionado anteriormente, los efectos de la radiación también serán tenidos en cuenta para calcular la demanda térmica. Con esta ecuación se hará algo similar a lo que se hizo al calcular la  $GD_0$ : se suman los efectos de la irradiancia solar sobre plano horizontal diferenciando por estación y asumiendo nuevamente estaciones

de tres meses en el caso de invierno y de cuatro meses en verano, lo que será corregido más adelante, como en el caso de los grados-día.

$$SCI_0 = a \cdot RAD_0 + b \cdot GD_0 + c \cdot RAD_0 \cdot GD_0 + d \cdot RAD_0^2 + e \cdot GD_0^2 + f$$

|          | a                     | b                     | c                      | d                      | e                      | f                      |
|----------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Invierno | $-8,35 \cdot 10^{-3}$ | $3,72 \cdot 10^{-3}$  | $-8,62 \cdot 10^{-6}$  | $4,88 \cdot 10^{-5}$   | $7,15 \cdot 10^{-7}$   | $-6,81 \cdot 10^{-2}$  |
| Verano   | $3,724 \cdot 10^{-3}$ | $1,409 \cdot 10^{-2}$ | $-1,869 \cdot 10^{-5}$ | $-2,053 \cdot 10^{-6}$ | $-1,389 \cdot 10^{-5}$ | $-5,434 \cdot 10^{-1}$ |

Tabla 2: Coeficientes de correlación de la severidad climática.

Con la ecuación anterior y los valores previamente calculados se procede a calcular la severidad climática. Para calcular la severidad climática se emplean los valores de la regresión proporcionados por CTE-DB-HE. [CTE09]

$$\rho = a + 2 \cdot d \cdot RAD_0 + c \cdot GD_0$$

$$\delta = b + c \cdot RAD_0 + 2 \cdot e \cdot GD_0$$

$$DR_i = \frac{\alpha + \beta \cdot (SCI_0 - \rho \cdot RAD_0 - \delta \cdot GD_0)}{24 \cdot N_d} + \left(\frac{\beta \cdot \rho}{N_m}\right) \cdot r_i + \left(\frac{\beta \cdot \delta}{24 \cdot N_m}\right) \cdot \Delta T_i$$

| EDIFICIOS NUEVOS        | $\alpha$ | $\beta$ |
|-------------------------|----------|---------|
| Viviendas Unifamiliares | 9,29     | 54,98   |
| Viviendas en bloque     | 3,51     | 39,57   |

Tabla 3: Valores de alpha y beta para invierno.

| EDIFICIOS NUEVOS        | $\alpha$ | $\beta$ |
|-------------------------|----------|---------|
| Viviendas Unifamiliares | -4,24    | 20,41   |
| Viviendas en bloque     | -3,44    | 14,44   |

Tabla 4: Valores de alpha y beta para verano.

Para poder calcular la demanda de referencia de cada hora se determinan  $\rho$  y  $\delta$  con los mismos valores proporcionados para la regresión de la severidad climática CTE-DB-HE [BARR20]. Con todos estos valores se puede ya calcular la demanda de referencia para cada hora, que será con la que se obtenga la demanda final. Cabe destacar que, aunque los valores de Alpha y de Beta usados son para edificios nuevos se utilizan esos valores por norma, luego se tendrá en cuenta la eficiencia del aislamiento para ver cómo afecta a la demanda. Para corregir el efecto de considerar el mes de invierno como de tres meses y el de verano como de cuatro en vez de los seis meses planteados se aplican las siguientes ecuaciones:

$$k = \frac{DR_{referencia}}{\sum DR_i}$$

$$DR = k \cdot DR_i$$

|          |                | Edificios unifamiliares           |                                     | Edificios en bloque               |                                     |
|----------|----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
|          | Zona climática | Calefacción [kWh/m <sup>2</sup> ] | Refrigeración [kWh/m <sup>2</sup> ] | Calefacción [kWh/m <sup>2</sup> ] | Refrigeración [kWh/m <sup>2</sup> ] |
| Invierno | $\alpha$       | 0,00                              |                                     | 0,00                              |                                     |
|          | A              | 23,60                             |                                     | 13,80                             |                                     |
|          | B              | 33,50                             |                                     | 20,90                             |                                     |
|          | C              | 53,30                             |                                     | 35,20                             |                                     |
|          | D              | 78,00                             |                                     | 53,00                             |                                     |
|          | E              | 103,3                             |                                     | 71,20                             |                                     |
| Verano   | 1              |                                   | 0,00                                |                                   | 0,00                                |
|          | 2              |                                   | 10,70                               |                                   | 7,10                                |
|          | 3              |                                   | 21,70                               |                                   | 14,90                               |
|          | 4              |                                   | 30,30                               |                                   | 21,00                               |

Tabla 5: Valores de referencia de la demanda térmica según la zona climática.

Para corregir los efectos en los cálculos de haber utilizado estaciones de duración distinta a seis meses, se utilizará la demanda de referencia anual para un bloque de edificios según la zona climática. Con esos valores se obtiene un factor de corrección  $k$  que será aplicado a cada hora para ajustar el cálculo de la demanda referencia. Una vez se tiene esto, ya se puede calcular la demanda térmica final:

$$\frac{I_0}{\bar{I}_r} = \frac{1 + (C_1 - 0,6) \cdot 2 \cdot (R - 1)}{R}$$

$$D = DR \cdot \left(\frac{I_0}{\bar{I}_r}\right) \cdot A$$

donde DR representa la demanda referencia previamente calculada y  $C_1$  y R son unos coeficientes que vienen determinados por el aislamiento de la vivienda, del tipo de edificio y del aislamiento térmico. Para calcular la demanda final debemos multiplicar por el área total que pretendemos climatizar.

| Zona Climática de Invierno | Viviendas Unifamiliares | Viviendas en Bloque |
|----------------------------|-------------------------|---------------------|
| A                          | 1,7                     | 1,7                 |
| B                          | 1,6                     | 1,7                 |
| C                          | 1,5                     | 1,7                 |
| D                          | 1,5                     | 1,7                 |
| E                          | 1,4                     | 1,7                 |

*Tabla 6: Valores de R para el cálculo de la demanda de calefacción.*

| Zona Climática de Verano | Viviendas Unifamiliares | Viviendas en Bloque |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1                        | -                       | -                   |
| 2                        | 1,5                     | 1,6                 |
| 3                        | 1,4                     | 1,5                 |
| 4                        | 1,4                     | 1,5                 |

*Tabla 7: Valores de R para el cálculo de la demanda de refrigeración.*

| Valores de C1 según zona climática y antigüedad |        |           |           |
|---|--------|-----------|-----------|
| ZCI   | <=1980 | 1981-2007 | 2008-2018 |
| A   | 4,41   | 2,48      | 0,99      |
| B   | 4,01   | 2,34      | 0,96      |
| C   | 3,69   | 2,23      | 0,93      |
| D   | 3,53   | 2,18      | 0,92      |
| E   | 3,46   | 2,15      | 0,91      |

*Tabla 8: Valores de C1 según la zona climática de invierno y la antigüedad del edificio [BARR21].*

Con todas estas ecuaciones previamente desarrolladas y con la información climatológica de los archivos MET se puede calcular la demanda térmica para las distintas zonas climáticas presentes en España. Una vez calculada la demanda horaria es posible representar la monótona de la demanda térmica. La monótona de la demanda energética es la gráfica que representa la demanda ordenada de mayor a menor a lo largo del año. La Figura 5 representa la monótona de la demanda térmica de un edificio de 6.000 m<sup>2</sup> con aislamiento medio para cada una de las zonas climáticas de invierno: A, B, C, D y E.

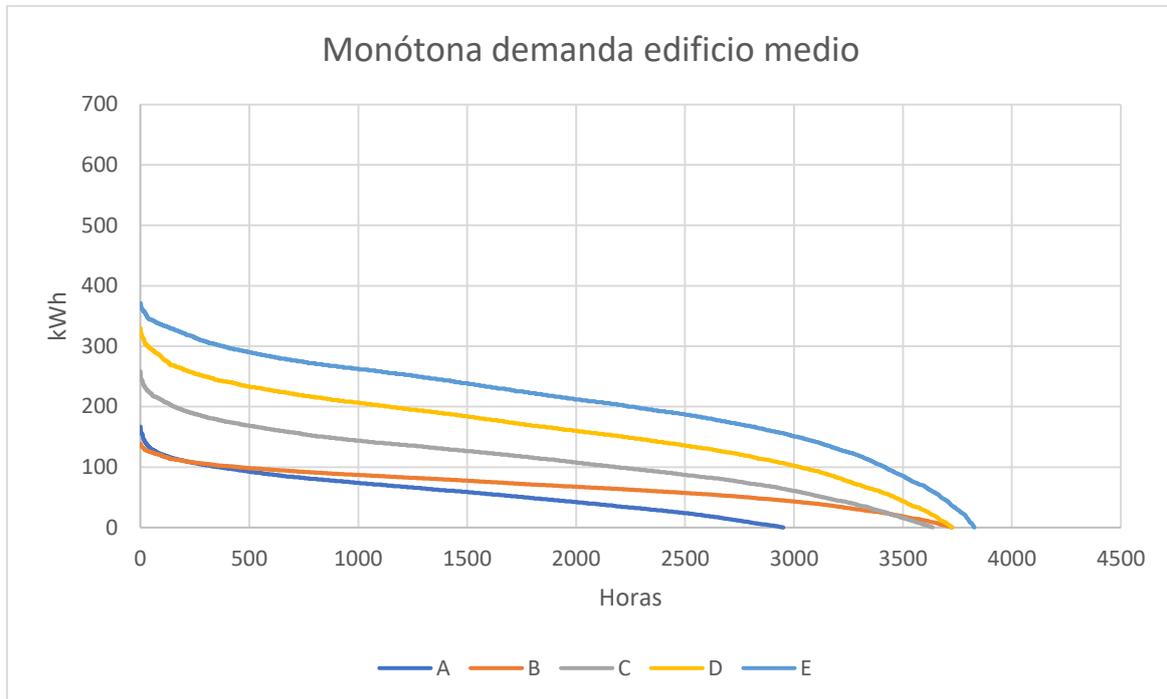
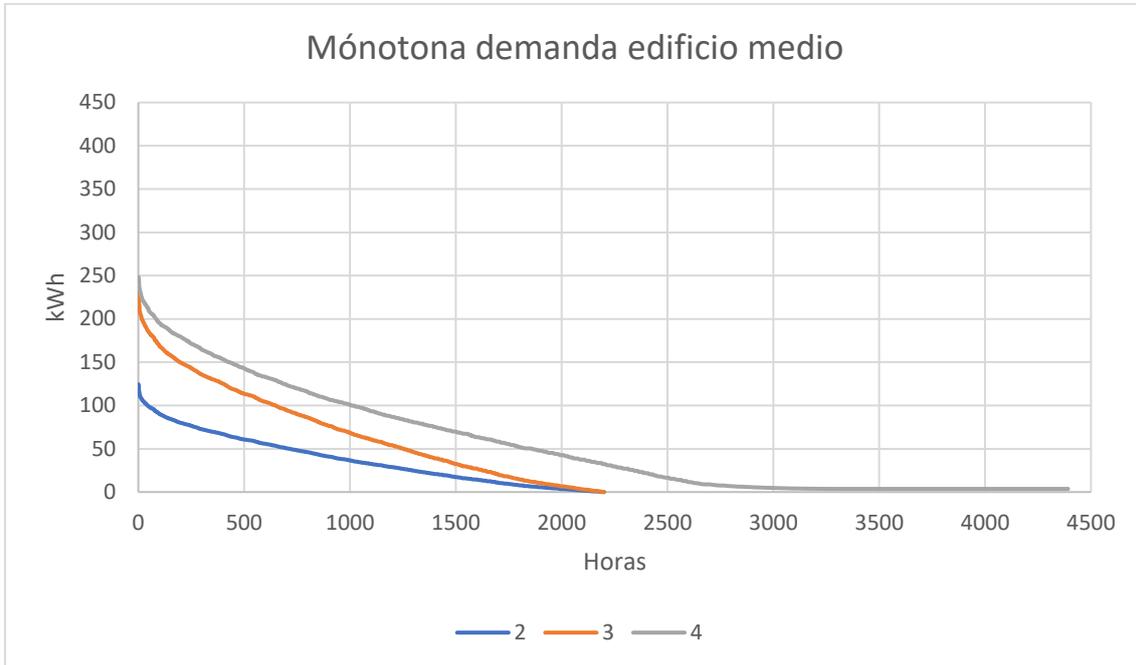


Figura 5: Monótona de la demanda térmica en invierno para edificios con aislamiento medio.

Como se observa en la Figura 5, la zona climática A se corresponde con una zona con un invierno muy suave y, a medida que se avanza hacia la zona climática E, los inviernos son más fríos y largos.

La Figura 6 representa la monótona de la demanda de refrigeración para un edificio de 6.000 m<sup>2</sup> con aislamiento medio en las distintas zonas de verano: 1, 2, 3, 4. La zona 1 se corresponde con ausencia de demanda de refrigeración en verano y la 4 con un verano muy caluroso.



*Figura 6: Monótona de la demanda térmica en verano para edificios con aislamiento medio.*

Comparando las Figuras 5 y 6 se desprende que la potencia de refrigeración es inferior a la demandada para calefacción. Esto es debido a que la diferencia térmica con respecto a las condiciones definidas como ideales para el proyecto ( $20^{\circ}\text{C}$ ) es superior en invierno que en verano. Para ver los efectos en la demanda del aislamiento térmico se representa en las Figuras 7 a 10 la monótona de la demanda para edificios con distintos aislamientos térmicos. De ellas se desprende que los efectos de un buen aislamiento pueden ser críticos. Vivir en una casa con un aislamiento deficiente puede hacer que se multiplique por más de tres el consumo energético, comparado con el consumo de una vivienda moderna con buen aislamiento térmico.

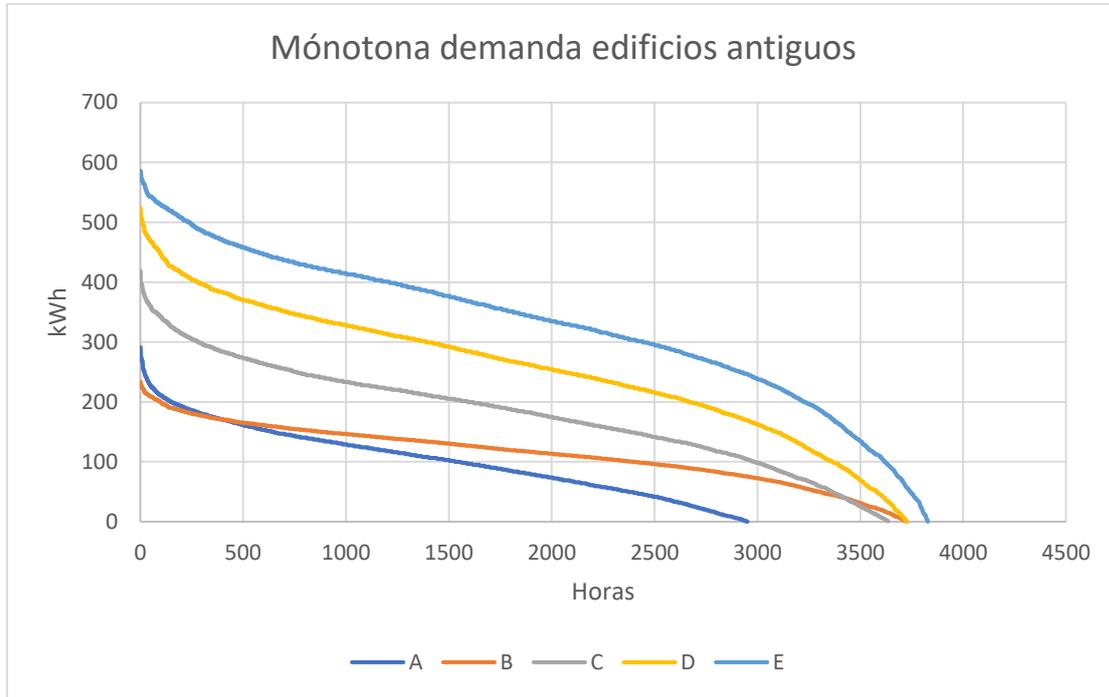


Figura 7: Monótona de la demanda en invierno para edificios con aislamiento deficiente.

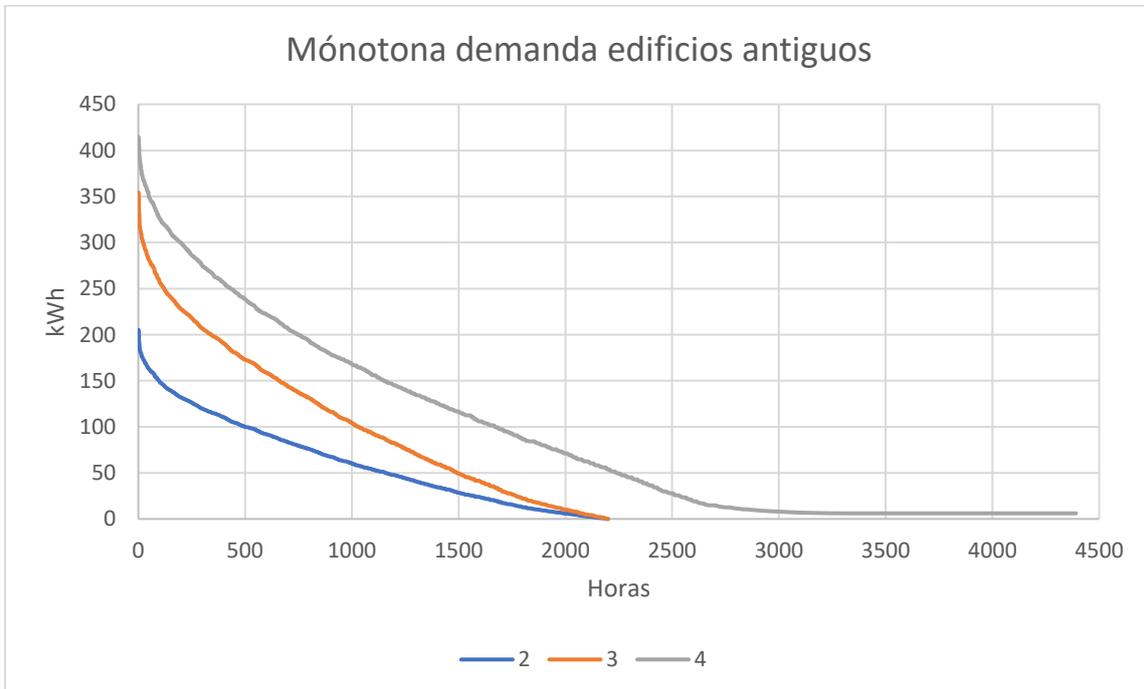


Figura 8: Monótona de la demanda térmica en verano para edificios con aislamiento deficiente.

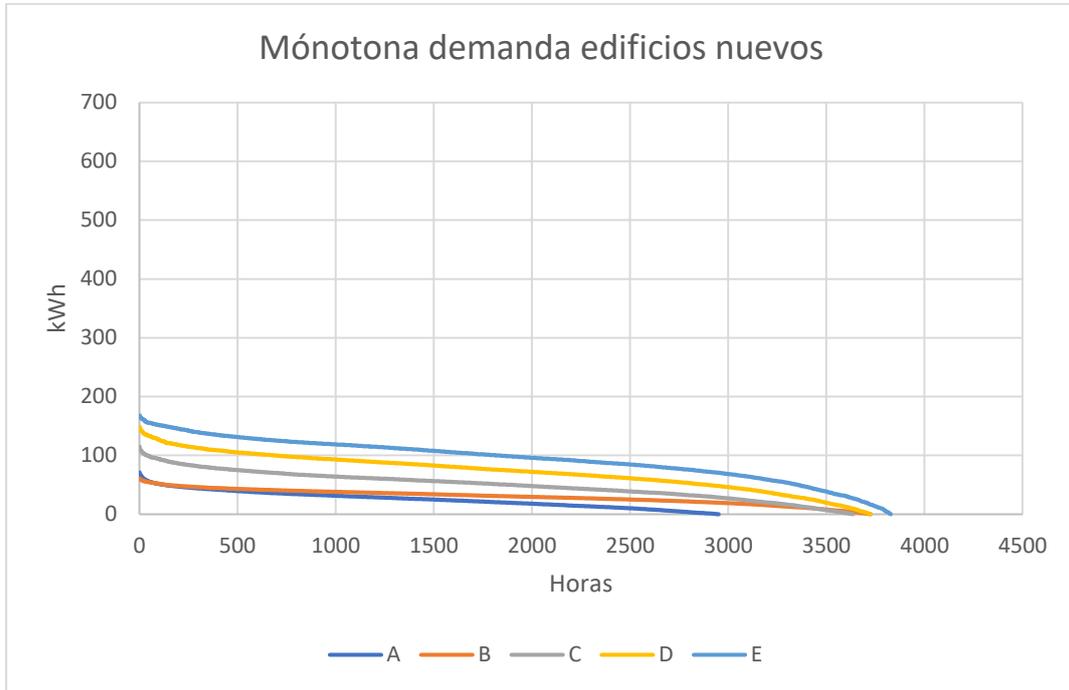


Figura 9: Monótona de la demanda térmica en invierno para edificios con aislamiento moderno.

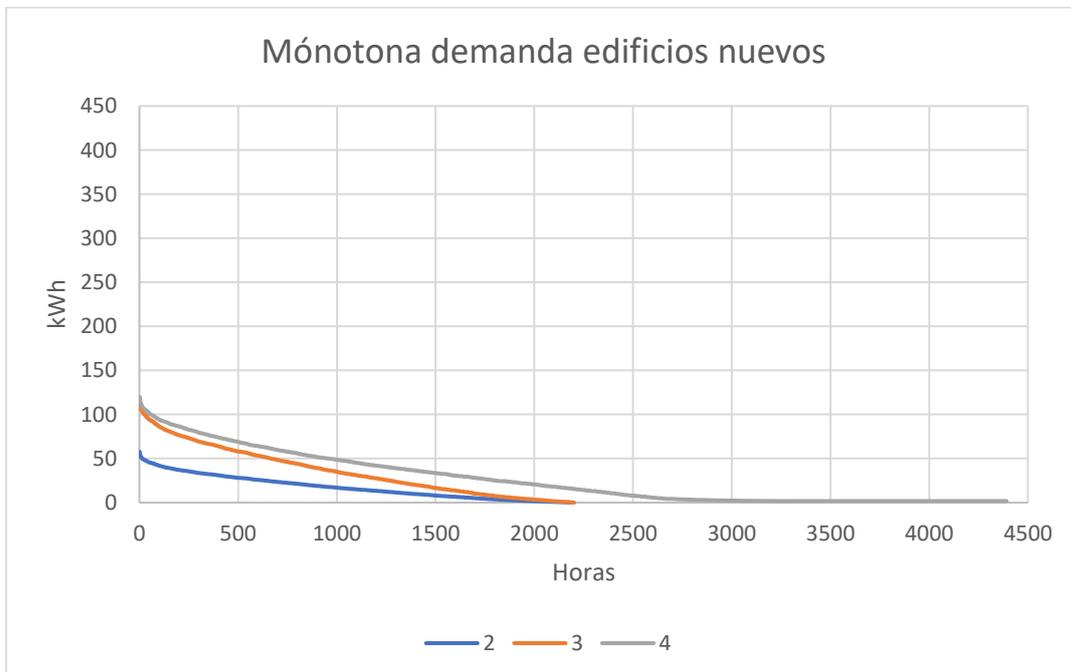


Figura 10: Monótona de la demanda térmica en verano para edificios con aislamiento moderno.

A raíz de lo anterior, se pueden suceder múltiples posibles escenarios climáticos. En este proyecto se estudiarán tres casos: una zona climática con una gran demanda de calefacción y sin demanda de climatización en verano (E1), la demanda de una zona con invierno suave y gran demanda de climatización en verano (A4) y otro con grandes demandas de climatización tanto en invierno como en verano (D3).

### **3.2 Caracterización de las bombas de calor aerotérmicas accionadas por gas natural**

Para este estudio se utilizarán dos bombas de calor distintas: una de una potencia nominal de 75 kW y otra de 25 kW. Se utilizarán estos dos modelos ya que son los proporcionados por el fabricante. Combinar estos dos modelos permitirá utilizar las bombas de mayor potencia nominal para cubrir el grueso de la demanda ya que tienen mejores rendimientos y la bomba de 25 kW será utilizada para cubrir esa “última” parte de la demanda ya que permite optimizar el grado de carga de las bombas en funcionamiento.

Para caracterizar el funcionamiento de las bombas de calor se utilizarán las Tablas 9 y 10, que definen el funcionamiento de las máquinas en distintas condiciones de trabajo.

| Temperatura exterior (°C) | Grado de carga (%) | Potencia climatización (kW) | Potencia Consumida (kW) | ACS (kW) |
|---------------------------|--------------------|-----------------------------|-------------------------|----------|
| 35                        | 100%               | 63,5                        | 55                      | 27,55    |
| 35                        | 90%                | 57,1                        | 47,5                    | 23,75    |
| 35                        | 80%                | 50,7                        | 404,4                   | 20,2     |
| 35                        | 70%                | 44,3                        | 34,8                    | 17,4     |
| 35                        | 60%                | 38                          | 29,2                    | 14,6     |

|    |      |       |       |       |
|----|------|-------|-------|-------|
| 35 | 50%  | 31,6  | 23,9  | 11,95 |
| 35 | 40%  | 25,2  | 18,8  | 9,4   |
| 35 | 30%  | 18,9  | 13,6  | 6,8   |
| 27 | 100% | 71    | 53,1  | 26,55 |
| 27 | 90%  | 63,9  | 46,4  | 23,2  |
| 27 | 80%  | 56,9  | 39,7  | 19,85 |
| 27 | 70%  | 49,8  | 33    | 16,5  |
| 27 | 60%  | 42,6  | 27,1  | 13,55 |
| 27 | 50%  | 35,4  | 21,4  | 10,7  |
| 27 | 40%  | 28,3  | 18,8  | 8,2   |
| 27 | 30%  | 21,2  | 11,5  | 5,75  |
| 22 | 100% | 75,7  | 51,9  | 25,93 |
| 22 | 90%  | 68,13 | 45,12 | 22,56 |
| 22 | 80%  | 60,56 | 38,09 | 19,04 |
| 22 | 70%  | 53,2  | 31,9  | 15,94 |
| 22 | 60%  | 45,42 | 25,4  | 12,7  |
| 22 | 50%  | 37,8  | 19,8  | 9,92  |
| 22 | 40%  | 30,28 | 14,68 | 7,34  |
| 22 | 30%  | 22,6  | 10,2  | 5,09  |
| 19 | 100% | 78,5  | 51,1  | 25,55 |
| 19 | 90%  | 70,65 | 43,8  | 21,94 |
| 19 | 80%  | 62,8  | 37,16 | 18,58 |
| 19 | 70%  | 53,2  | 30,02 | 15,6  |
| 19 | 60%  | 47,1  | 14,49 | 12,24 |
| 19 | 50%  | 37,8  | 18,23 | 9,45  |
| 19 | 40%  | 31,4  | 13,73 | 6,86  |
| 19 | 30%  | 22,6  | 9,04  | 4,7   |
| 12 | 100% | 74,5  | 49    | 14,7  |
| 12 | 90%  | 66,9  | 43,1  | 12,93 |
| 12 | 80%  | 59,3  | 37,2  | 11,16 |
| 12 | 70%  | 52,1  | 32,1  | 9,63  |
| 12 | 60%  | 44,8  | 27    | 8,1   |
| 12 | 50%  | 37,6  | 21,9  | 6,57  |
| 12 | 40%  | 29,9  | 17,2  | 5,16  |
| 12 | 30%  | 22,1  | 12,6  | 3,78  |
| 7  | 100% | 75    | 53,6  | 13,4  |
| 7  | 90%  | 67,4  | 47,5  | 11,88 |
| 7  | 80%  | 59,8  | 41,4  | 10,35 |
| 7  | 70%  | 52,4  | 35,4  | 8,85  |
| 7  | 60%  | 45    | 29,3  | 7,33  |
| 7  | 50%  | 37,6  | 23,7  | 5,93  |

|    |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|
| 7  | 40%  | 30,2 | 18,9 | 4,73 |
| 7  | 30%  | 22,8 | 14   | 3,5  |
| 2  | 100% | 73   | 63,5 | 0    |
| 2  | 90%  | 65,8 | 56   | 0    |
| 2  | 80%  | 58,6 | 48,5 | 0    |
| 2  | 70%  | 51,2 | 41,4 | 0    |
| 2  | 60%  | 47,7 | 34   | 0    |
| 2  | 50%  | 36,4 | 27,4 | 0    |
| 2  | 40%  | 29,3 | 21,7 | 0    |
| 2  | 30%  | 23   | 16,6 | 0    |
| -7 | 100% | 66,5 | 72,5 | 0    |
| -7 | 90%  | 59,9 | 63,6 | 0    |
| -7 | 80%  | 53,3 | 54,7 | 0    |
| -7 | 70%  | 46,6 | 46,5 | 0    |
| -7 | 60%  | 39,9 | 38,9 | 0    |
| -7 | 50%  | 33,3 | 31,3 | 0    |
| -7 | 40%  | 26,6 | 23,7 | 0    |

Tabla 9: Características de trabajo de la bomba de calor de 75 kW.

| Temperatura exterior (°C) | Grado de carga (%) | Potencia climatización (kW) | Potencia Consumida (kW) | ACS (kW) |
|---------------------------|--------------------|-----------------------------|-------------------------|----------|
| 40                        | 100%               | 21,1                        | 15,98                   | 8        |
| 40                        | 90%                | 19                          | 14,17                   | 7,1      |
| 40                        | 80%                | 16,9                        | 12,51                   | 6,25     |
| 40                        | 70%                | 14,8                        | 10,88                   | 5,45     |
| 40                        | 60%                | 12,7                        | 9,477                   | 4,75     |
| 40                        | 50%                | 10,6                        | 8,617                   | 4,3      |
| 35                        | 100%               | 22,4                        | 15,03                   | 7,5      |
| 35                        | 90%                | 20,2                        | 13,03                   | 6,5      |
| 35                        | 80%                | 17,9                        | 11,47                   | 5,75     |
| 35                        | 70%                | 15,7                        | 10                      | 5        |
| 35                        | 60%                | 13,4                        | 8,701                   | 4,35     |
| 35                        | 50%                | 11,2                        | 7,887                   | 3,95     |
| 30                        | 100%               | 23,7                        | 13,62                   | 6,8      |
| 30                        | 90%                | 21,3                        | 11,89                   | 5,95     |
| 30                        | 80%                | 18,9                        | 10,5                    | 5,25     |
| 30                        | 70%                | 16,5                        | 9,217                   | 4,6      |
| 30                        | 60%                | 14,2                        | 7,888                   | 3,95     |
| 30                        | 50%                | 11,8                        | 7,195                   | 3,6      |

|    |      |       |       |      |
|----|------|-------|-------|------|
| 25 | 100% | 24,9  | 12,38 | 6,2  |
| 25 | 90%  | 22,4  | 10,87 | 5,45 |
| 25 | 80%  | 19,9  | 9,521 | 4,75 |
| 25 | 70%  | 17,4  | 8,285 | 4,15 |
| 25 | 60%  | 14,9  | 7,303 | 3,65 |
| 25 | 50%  | 12,4  | 6,595 | 3,3  |
| 15 | 100% | 24,3  | 11,79 | 4,01 |
| 15 | 90%  | 21,7  | 10,48 | 3,57 |
| 15 | 80%  | 19,3  | 9,698 | 3,3  |
| 15 | 70%  | 16,8  | 9,6   | 3,26 |
| 15 | 60%  | 14,3  | 9,597 | 3,26 |
| 15 | 50%  | 11,9  | 8,5   | 2,89 |
| 11 | 100% | 24,6  | 13,59 | 4,08 |
| 11 | 90%  | 22,1  | 12,20 | 3,66 |
| 11 | 80%  | 19,6  | 10,82 | 3,24 |
| 11 | 70%  | 17,1  | 9,884 | 2,97 |
| 11 | 60%  | 14,6  | 9,798 | 2,94 |
| 11 | 50%  | 12,1  | 9,603 | 2,88 |
| 6  | 100% | 25    | 15,92 | 3,98 |
| 6  | 90%  | 22,5  | 14,42 | 3,6  |
| 6  | 80%  | 19,9  | 12,92 | 3,23 |
| 6  | 70%  | 17,4  | 11,29 | 2,83 |
| 6  | 60%  | 14,9  | 10,06 | 2,53 |
| 6  | 50%  | 12,4  | 9,92  | 2,53 |
| 1  | 100% | 26,5  | 21,72 | 2,48 |
| 1  | 90%  | 23,85 | 19,71 | 0    |
| 1  | 80%  | 21,09 | 17,57 | 0    |
| 1  | 70%  | 18,44 | 15,36 | 0    |
| 1  | 60%  | 15,79 | 13,73 | 0    |
| 1  | 50%  | 13,14 | 13,54 | 0    |
| -2 | 100% | 26,5  | 25,48 | 0    |
| -2 | 90%  | 23,85 | 22,93 | 0    |
| -2 | 80%  | 21,09 | 20,67 | 0    |
| -2 | 70%  | 18,44 | 18,07 | 0    |
| -2 | 60%  | 15,79 | 16,11 | 0    |
| -2 | 50%  | 13,14 | 15,83 | 0    |
| -7 | 100% | 26,5  | 27,04 | 0    |
| -7 | 90%  | 23,85 | 24,58 | 0    |
| -7 | 80%  | 21,09 | 21,96 | 0    |
| -7 | 70%  | 18,44 | 19,20 | 0    |
| -7 | 60%  | 15,79 | 17,16 | 0    |

|    |     |       |       |   |
|----|-----|-------|-------|---|
| -7 | 50% | 13,14 | 16,84 | 0 |
|----|-----|-------|-------|---|

*Tabla 10: Características de trabajo de la bomba de calor de 25 kW.*

Con estas tablas se llevará a cabo una regresión lineal que permitirá comprender cómo afectan las distintas variables al funcionamiento de la bomba. Para determinar si el modelo de regresión lineal es suficientemente bueno se emplea como límite inferior de  $R^2$  un valor de 95%; en caso de no conseguir ese valor mínimo se irán incrementando la complejidad de los modelos que tengan en cuenta la interacción entre las variables y que incluyan términos de polinomios de grado superior.

### 3.2.1 Bomba de 75 kW

#### 3.2.1.1 Calor proporcionado en función de la temperatura exterior y el grado de carga

Esta ecuación permitirá conocer cómo afecta el grado de carga y la temperatura exterior a la potencia de climatización.

$$Q_c = a_0 + a_1 * Grado_{carga} + a_2 * T_{amb}$$

|                      | Valor       | Error Estándar |
|----------------------|-------------|----------------|
| <b>a<sub>0</sub></b> | 0,714900972 | 1,327179       |
| <b>a<sub>1</sub></b> | 71.9167935  | 1,762664       |
| <b>a<sub>2</sub></b> | 0.03718169  | 3,140005       |

*Tabla 11: Valores de la regresión para el calor proporcionado 75 kW.*

| Métrica        | Valor                   |
|----------------|-------------------------|
| RMS            | 3,1678                  |
| Bias           | $4,7636 \cdot 10^{-18}$ |
| R <sup>2</sup> | 96.37%                  |

Tabla 12: Valores estadísticos de la regresión para el calor proporcionado 75 kW.

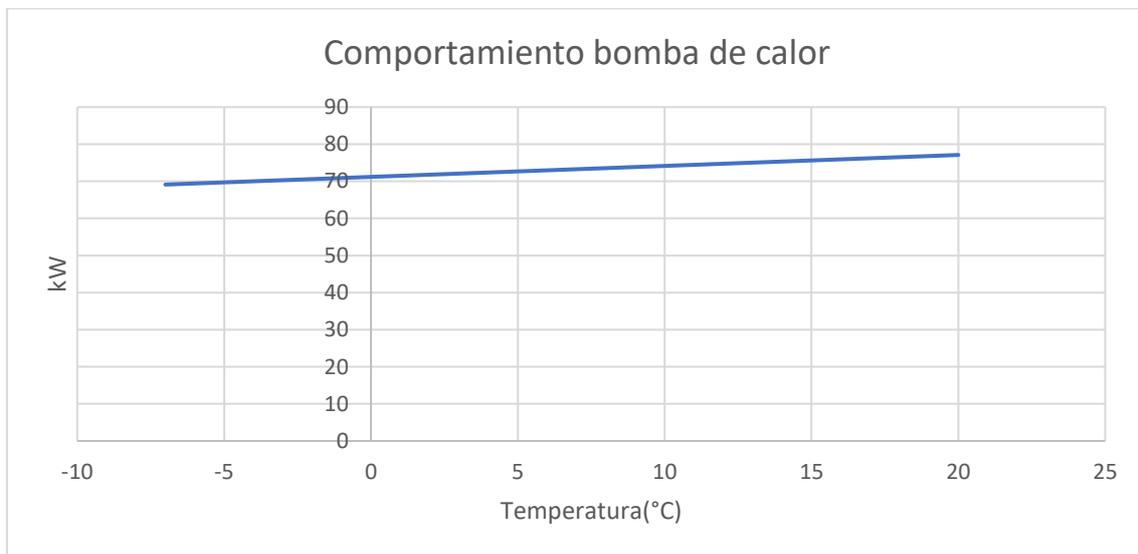


Figura 11: Comportamiento de la potencia entregada en función de la temperatura exterior 75 kW.

### 3.2.1.2 Consumo de gas en función de energía térmica proporcionada y la temperatura ambiente

Estas ecuaciones permitirán saber cuál es la energía necesaria para llevar la bomba a las condiciones de trabajo deseadas.

$$\text{Consumo} = a_0 + a_1 * T_{amb} + a_2 * T_{amb}^2 + a_3 * Q_c + a_4 * Q_c^2$$

|       | Valor       | Error Estándar |
|-------|-------------|----------------|
| $a_0$ | 2,24808     | 2,788006       |
| $a_1$ | -1,239446   | 0,06134589     |
| $a_2$ | 0,03489427  | 0,0001995928   |
| $a_3$ | 0,6903814   | 0,1227968      |
| $a_4$ | 0,001526826 | 0,001270924    |

Tabla 13: Valores de la regresión para el consumo 75 kW.

| Métrica | Valor                    |
|---------|--------------------------|
| RMS     | 2,553                    |
| Bias    | $-1,0904 \cdot 10^{-17}$ |
| $R^2$   | 97,13%                   |

Tabla 14: Valores estadísticos de la regresión para el consumo 75 kW

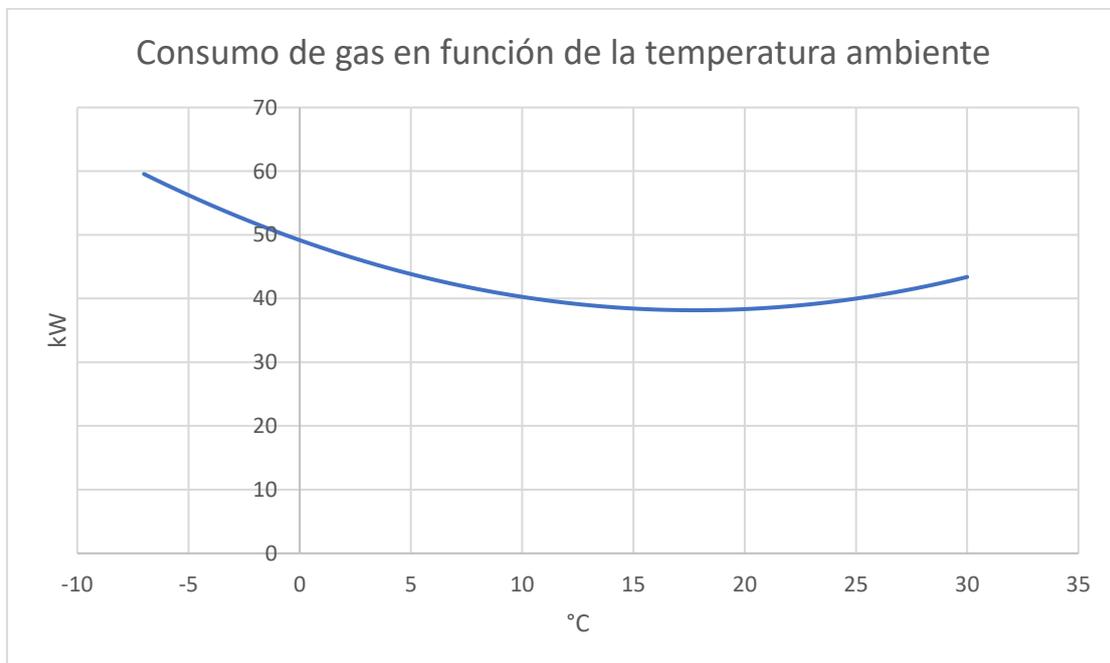


Figura 12: Comportamiento del consumo en función de la temperatura exterior.

### 3.2.1.3 Calor recuperable en función de la temperatura exterior y la potencia de climatización

Esta ecuación nos permitirá determinar en qué condiciones se pueden utilizar el calor del motor para calentar agua y de qué potencia se dispone para hacerlo.

$$ACS = a_0 + a_1 * T_{amb} + a_2 * T_{amb}^2 + a_3 * Q_c + a_4 * Q_c^2 + a_5 * T_{amb} * Q_c$$

|                      | Valor       | Error Estándar |
|----------------------|-------------|----------------|
| <b>a<sub>0</sub></b> | 3,325062    | 1,377667       |
| <b>a<sub>1</sub></b> | -0,13181084 | 0,07002704     |
| <b>a<sub>2</sub></b> | 0,000462893 | 0,001314505    |
| <b>a<sub>3</sub></b> | -0,07736263 | 0,04531152     |
| <b>a<sub>4</sub></b> | 0,001942842 | 0,0004077068   |
| <b>a<sub>5</sub></b> | 0,0175866   | 0,0007393393   |

Tabla 15: Valores de la regresión para el ACS 75 kW.

| Métrica              | Valor                     |
|----------------------|---------------------------|
| <b>RMS</b>           | 0,72981                   |
| <b>Bias</b>          | -2,7557*10 <sup>-19</sup> |
| <b>R<sup>2</sup></b> | 98,83%                    |

Tabla 16: Valores estadísticos de la regresión para el ACS 75 kW.

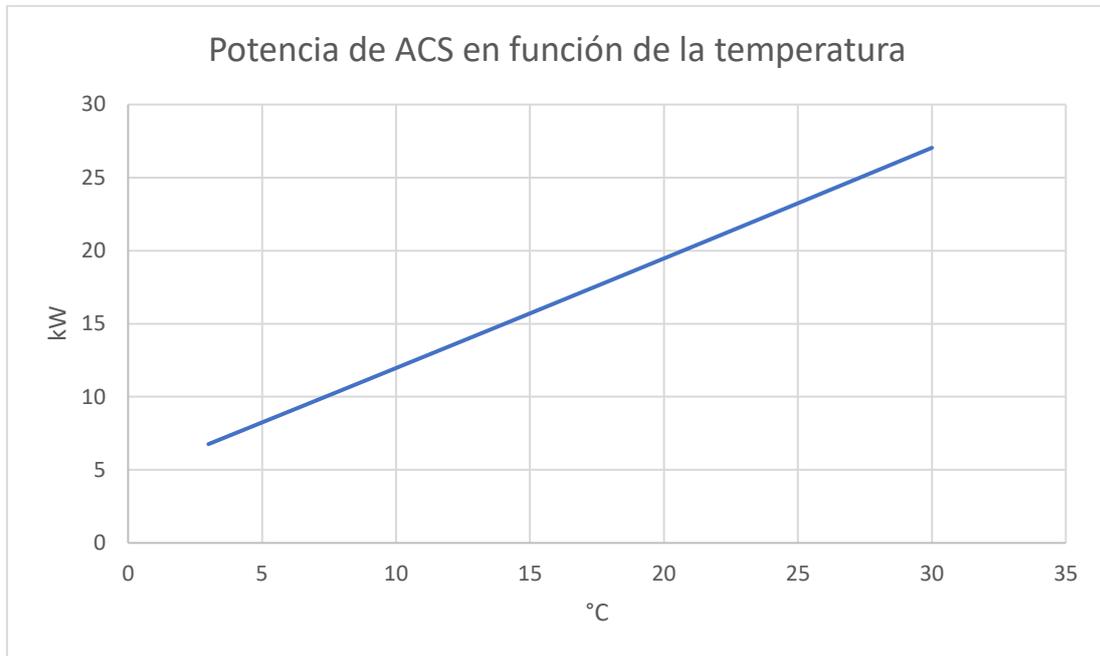


Figura 13: Potencia de ACS en función de la temperatura exterior.

La Figura 13 muestra cómo a medida que la temperatura en el evaporador aumenta se consume menos calor del motor en el desescarhe, pudiendo utilizar ese calor para calentar agua (ACS del propio edificio o de edificios próximos).

### 3.2.2 Bomba de 25 kW

#### 3.2.2.1 Calor proporcionado en función de la temperatura exterior y el grado de carga

$$Q_c = a_0 + a_1 * Grado_{carga} + a_2 * T_{amb}$$

|       | Valor        | Error Estándar |
|-------|--------------|----------------|
| $a_0$ | -0,937131059 | 0,3383719      |
| $a_1$ | 24,7482857   | 0,4296231      |
| $a_2$ | -0,074427187 | 0,004722005    |

Tabla 17: Valores de la regresión para la potencia entregada 25 kW.

| Métrica | Valor                    |
|---------|--------------------------|
| RMS     | 0,56834                  |
| Bias    | $-2,3274 \cdot 10^{-18}$ |
| $R^2$   | 98,35%                   |

Tabla 18: Valores estadísticos de la regresión para el calor entregado 25 kW

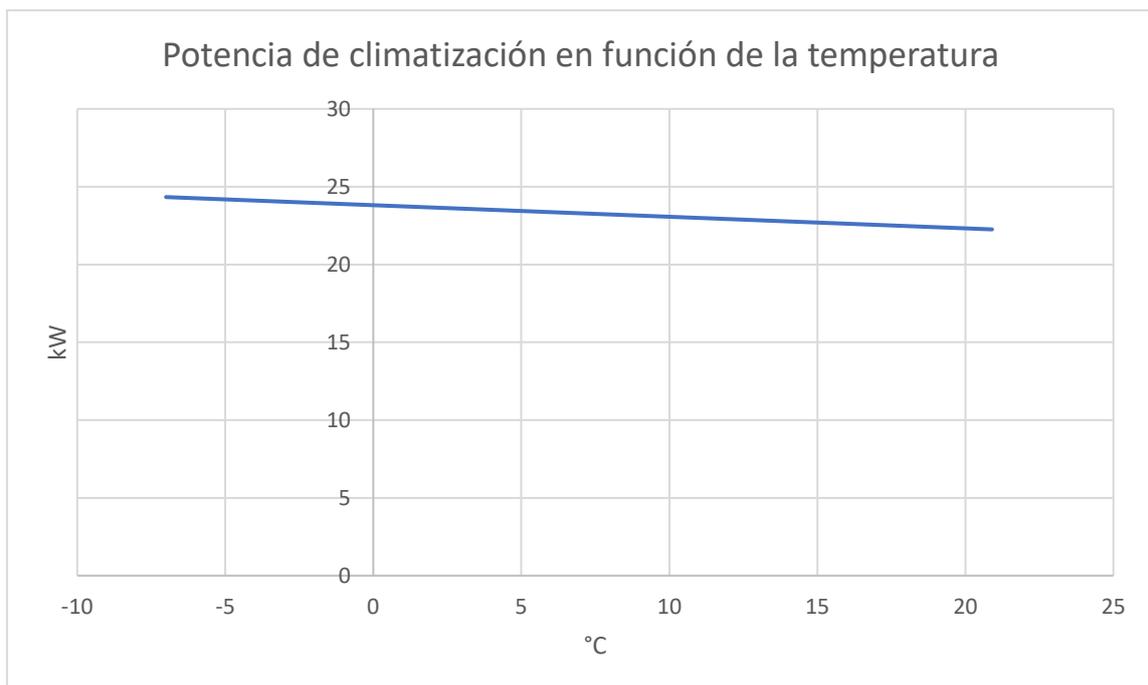


Figura 14: Potencia de climatización en función de la temperatura exterior.

En este modelo de bomba, para no penalizar en exceso el rendimiento de la maquina se aprecia que el calor del motor se empieza a utilizar a temperaturas ambiente más altas

produciendo así que la bomba proporcione más calor cuando las temperaturas disminuyen. Los efectos de esta estrategia se podrán ver en un consumo superior de gas natural y una menor disponibilidad de calor para ACS.

### 3.2.2.2 Consumo de gas en función de energía térmica proporcionada y la temperatura ambiente

$$\text{Consumo} = a_0 + a_1 * T_{amb} + a_2 * T_{amb}^2 + a_3 * Q_c + a_4 * Q_c^2 + a_5 * T_{amb} * Q_c$$

|                      | Valor          | Error Estándar |
|----------------------|----------------|----------------|
| <b>a<sub>0</sub></b> | 13,47885       | 3,10473        |
| <b>a<sub>1</sub></b> | -0,610211      | 0,05496532     |
| <b>a<sub>2</sub></b> | 0,01364459     | 0,0007251772   |
| <b>a<sub>3</sub></b> | -0,3136262     | 0,3264011      |
| <b>a<sub>4</sub></b> | 0,02386973     | 0,008291255    |
| <b>a<sub>5</sub></b> | -0,00006729405 | 0,002388825    |

Tabla 19: Valores de la regresión para el consumo de gas 25 kW.

| Métrica              | Valor                    |
|----------------------|--------------------------|
| <b>RMS</b>           | 1,0283                   |
| <b>Bias</b>          | 6,1438*10 <sup>-19</sup> |
| <b>R<sup>2</sup></b> | 95,51%                   |

Tabla 20: Valores estadísticos de la regresión para el consumo 25 kW

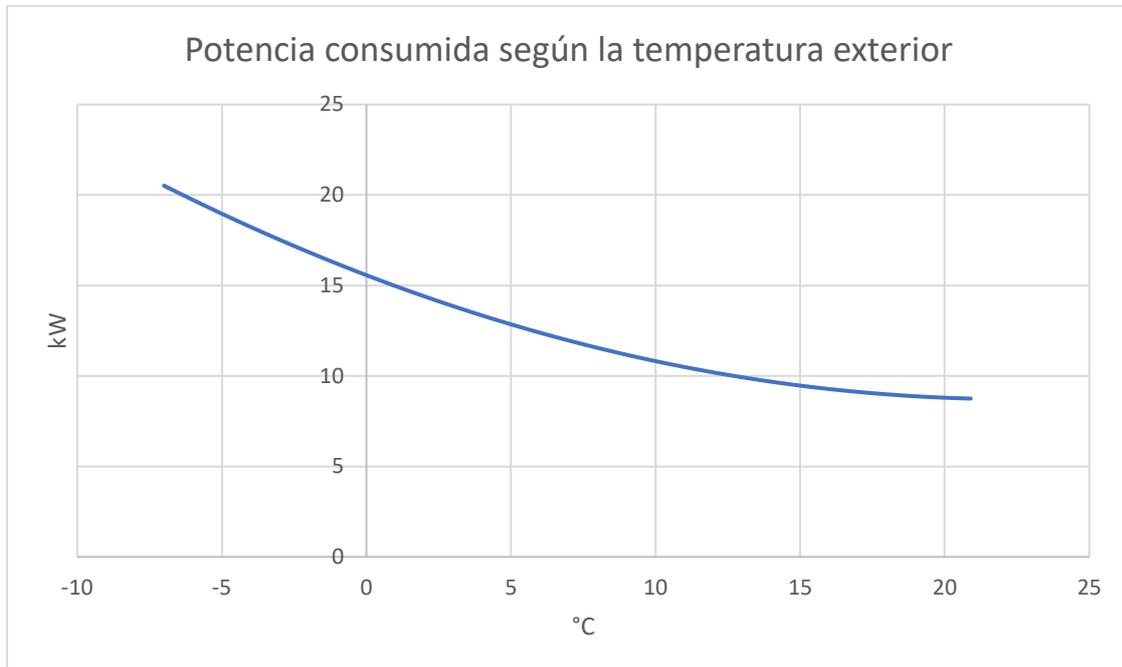


Figura 15: Potencia consumida según la temperatura exterior.

### Calor recuperable en función de la temperatura exterior y el grado de carga

$$ACS = a_0 + a_1 * T_{amb} + a_2 * T_{amb}^2 + a_3 * Grado_{carga} + a_4 * Grado_{carga}^2 + a_5 * T_{amb} * Grado_{carga}$$

|                      | Valor       | Error Estándar |
|----------------------|-------------|----------------|
| <b>a<sub>0</sub></b> | 4,440999    | 0,7144897      |
| <b>a<sub>1</sub></b> | -0,07681063 | 0,01733919     |
| <b>a<sub>2</sub></b> | 0,000843054 | 0,0002860256   |
| <b>a<sub>3</sub></b> | -6,096458   | 1,843366       |
| <b>a<sub>4</sub></b> | 4,711735    | 1,201786       |
| <b>a<sub>5</sub></b> | 0,1706649   | 0,0148136      |

Tabla 21: Valores de la regresión para el ACS 25 kW.

| Métrica        | Valor                    |
|----------------|--------------------------|
| RMS            | 0,19428                  |
| Bias           | $-9,2932 \cdot 10^{-20}$ |
| R <sup>2</sup> | 98,13%                   |

Tabla 22: Valores estadísticos de la regresión para el ACS 25 kW

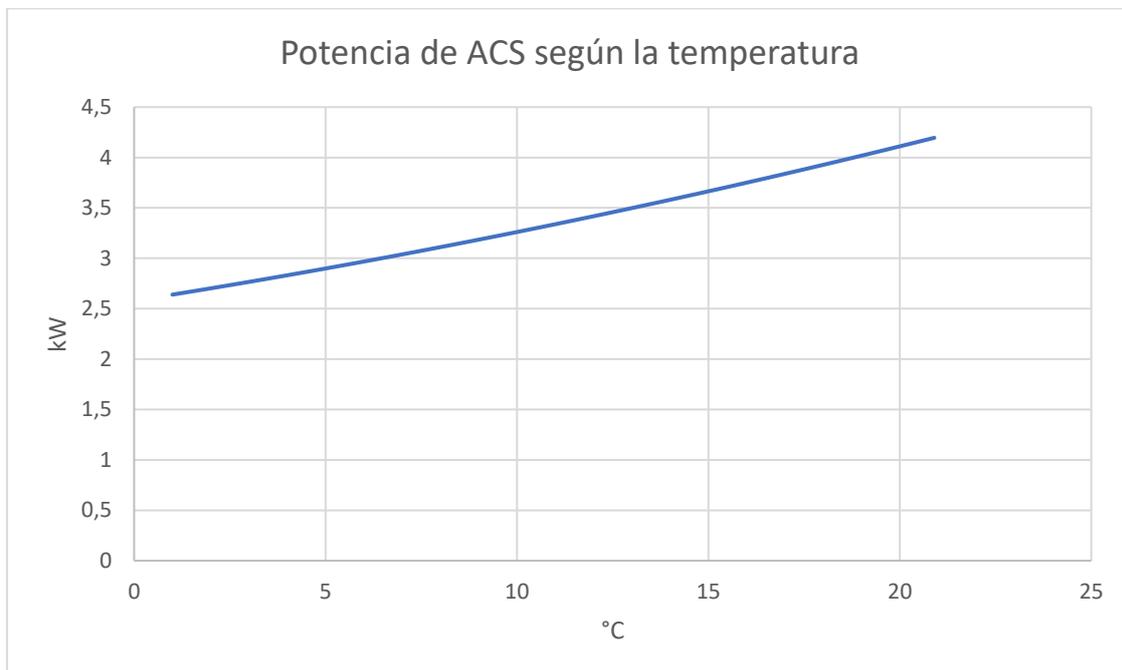


Figura 16: Potencia de ACS en función de la temperatura exterior.

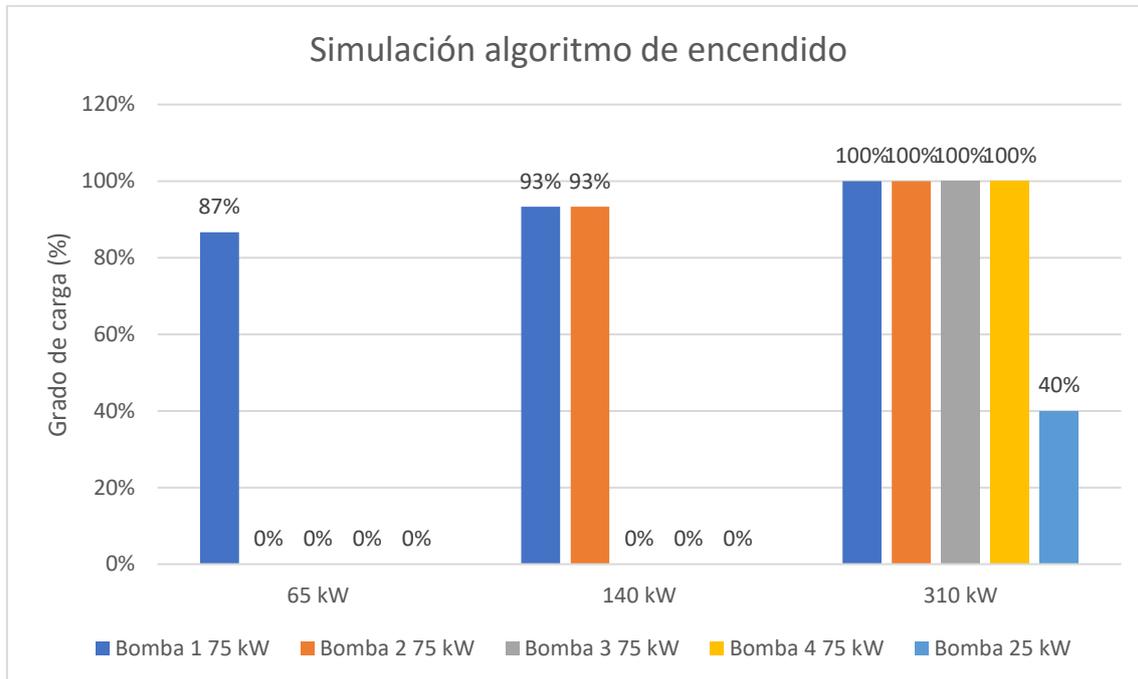
Como se ha mencionado anteriormente, la estrategia de maximizar el calor de climatización penaliza la cantidad de calor disponible para ACS.

Una vez realizado el modelo que caracteriza todas las bombas y conocida la demanda térmica, se procede a configurar el funcionamiento de las bombas de calor para que puedan satisfacer la demanda térmica de la forma más eficiente posible.

El algoritmo seguido para asignar las bombas que serán encendidas y el grado de carga en el que trabajarán es el siguiente:

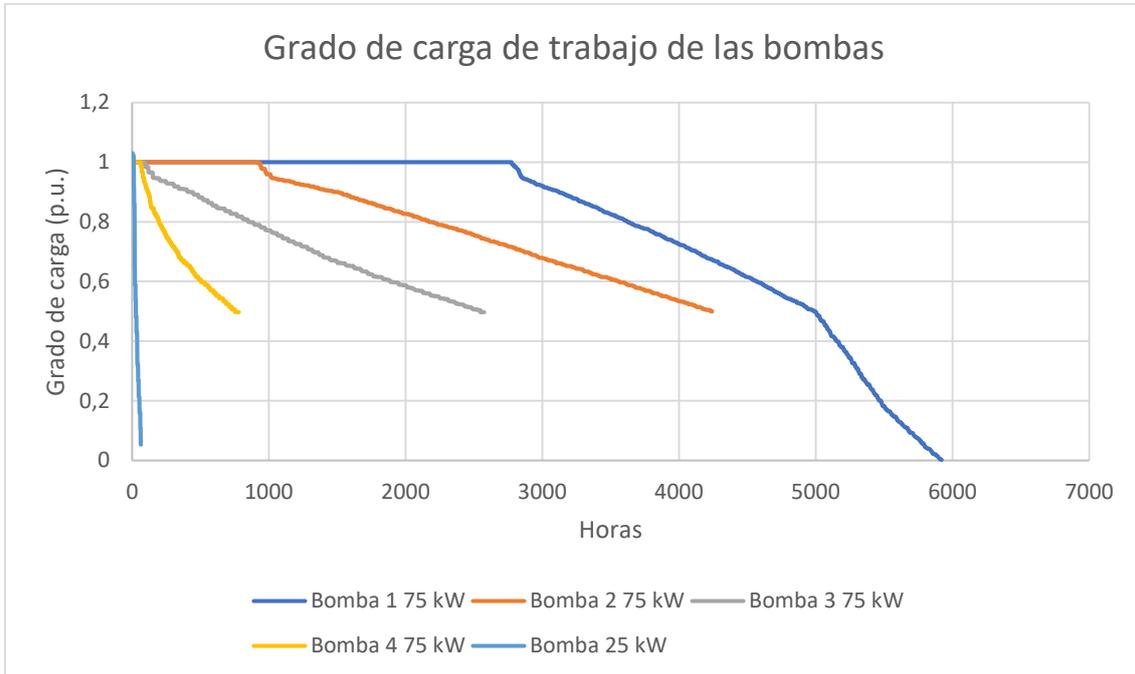
1. Conocida la demanda térmica para una hora, si una única bomba es capaz de satisfacer la demanda, sólo se encenderá una bomba.
2. Si la demanda es superior a la potencia máxima que puede entregar una bomba, ésta ha de distribuirse entre dos o más maquinas. Si la demanda es superior a la potencia que podrían proporcionar 1,9 bombas la primera trabaja a potencia nominal y la siguiente abastece el resto. Si la potencia requerida es inferior a la proporcionada por 1,9 bombas, las dos bombas se repartirán la demanda, así como mínimo una bomba trabajara al 50% de su capacidad.
3. En el caso de las bombas de 25 kW, hacen la función de apoyo para las horas más intempestivas. Estas bombas únicamente entrarán en funcionamiento cuando todas las bombas de 75 kW estén a carga nominal y la demanda no pueda ser satisfecha.

En la Figura 17 se representa de una forma más visual el comportamiento descrito en el párrafo anterior. Como podemos ver en dicha Figura, siempre será priorizado que haya el mayor número de bombas de 75 kW en el mayor grado de carga posible, aunque se penalice el rendimiento de la bomba de 25 kW. Esto se debe a que las bombas de 75 kW tienen un rendimiento superior a la de 25 kW.



*Figura 17: Gráfico explicativo del sistema de encendido de las bombas.*

Una vez comprendido el funcionamiento de las bombas de calor y el criterio que se usará para encender las bombas para satisfacer la demanda se procede a estudiar el caso base, consistente en un bloque de viviendas de 6.000 m<sup>2</sup> situado en Madrid (Zona D3). Para este caso la instalación requerida será de cuatro bombas de 75 kW y una de 25 kW. La Figura 18 muestra a qué grado de carga han estado trabajando cada una de las bombas para poder satisfacer la demanda. De esta Figura se desprende que el sistema de climatización está diseñado para que la demanda de las bombas recaiga sobre todo en las bombas grandes que tienen un rendimiento superior y que la bomba de 25 kW este de apoyo para los picos de demanda.



*Figura 18: Monótona del grado de carga de las bombas.*

### 3.3 Modelo económico

El indicador de referencia usado para determinar la viabilidad económica de un proyecto de climatización es el Levelized Cost of Heating (LCOH), o coste normalizado de producción de calor. El LCOH es un método para analizar y comparar distintas tecnologías de producción energética, ya que se trata de una técnica que considera la inversión inicial y los diferentes costes de producción a lo largo de la vida útil del proyecto, asumiendo cierta constancia en dichos costes de producción, es decir, en ausencia de los riesgos asociados al mercado o a la tecnología. La utilización del coste normalizado para proyectos energéticos tiene su origen en la necesidad de conocer las tarifas a las que se debe de vender la energía, en este caso el calor.

En cuanto a la información sobre la inversión requerida, ésta ha sido obtenida del catálogo del fabricante (Panasonic). En el caso del de la bomba de 25 kW se utilizó como

referencia la bomba U-10ME2E8 que tiene un precio de 10.940 €. En el caso de la bomba de 75 kW, al no tener el fabricante un modelo de la misma potencia nominal que la bomba utilizada en este proyecto, se ha decidido interpolar el precio de dos de sus modelos para obtener una estimación del precio. Para la interpolación se utilizaron los modelos de Panasonic U-20GE3E5 de potencia nominal de 63 kW y el modelo U-30GE3E5 de potencia nominal de 80 kW:

$$Precio = Precio_{20G} + \frac{Precio_{30G} - Precio_{20G}}{Potencia_{30G} - Potencia_{20G}} (75 - Potencia_{20G})$$

Aplicando la fórmula se obtiene un precio para la bomba de 75 kW modelada de 43.940,77 €. A su vez, se ha tenido en cuenta el efecto de las economías de escala a la hora de calcular el valor de la inversión. Es decir, no se obtiene el mismo precio por unidad cuando se compra una bomba de calor que cuando se compran varias. Para tener en cuenta estos efectos de las economías de escala se ha utilizado la siguiente fórmula en las situaciones en las cuales se requería comprar más de un equipo del mismo modelo.

$$Precio_{escalado} = Precio_{unitario} * unidades^{0,6}$$

Estos factores fueron confirmados como razonables por la Asociación Española del Gas (SEDIGAS) a la hora de comprar este tipo de equipos, por lo que utilizar este factor permitirá dar valores del LCOH más realistas.

Las bombas de calor han de ser revisadas regularmente para poder garantizar el estado de las máquinas y el correcto funcionamiento de las mismas. El coste anual del mantenimiento y revisión de las bombas de calor es de unos 475 € por bomba.

En cuanto al coste de la energía requerida, el gas, la tarifa empleada es la proporcionada por Endesa. Debido a las necesidades térmicas de las instalaciones se utiliza la tarifa 3.4, al ser el consumo de gas siempre superior a 100.000 kWh. La información proporcionada por Endesa para dicha tarifa es la dada en la Tabla 23. A los valores anteriores hay que aplicarles algunos impuestos: al término variable se le aplica el impuesto a los hidrocarburos (Ley 15/2012) que queda fijado en 0,002341€/kWh y a su vez tendremos que calcular el IVA imponible, en este caso 21%; en cuanto al término fijo, simplemente habría que añadir el IVA, también del 21%. De este modo se obtienen los valores dados en la Tabla 24.[ENDE21]

|                         |              |
|-------------------------|--------------|
| <b>Término fijo</b>     | 80,97€/mes   |
| <b>Término variable</b> | 0,04385€/kWh |

*Tabla 23: Tarifa de gas 3.4 de Endesa.*

|                         |              |
|-------------------------|--------------|
| <b>Término fijo</b>     | 97,97€/mes   |
| <b>Término variable</b> | 0,05589€/kWh |

*Tabla 24: Tarifa de gas 3.4 de Endesa con impuestos.*

Los distintos componentes del LCOH se calculan de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$LC_{Bombas} = \frac{\sum C_{bombas} \cdot f_a}{\sum Energía_{suministrada}}$$

$$LC_{Gas} = \frac{\sum C_{Gas} \cdot f_a \cdot f_E^G}{\sum Energía_{suministrada}}$$

$$LC_{\text{Mantenimiento}} = \frac{\sum C_{\text{Mantenimiento}} \cdot f_a \cdot f_E^M}{\sum \text{Energía}_{\text{suministrada}}}$$

Las fórmulas de los factores ( $f_a$  y  $f_E$ ) que multiplican a los distintos costes se obtienen de la siguiente manera:

$$k = \frac{1 + r}{1 + WACC}$$

$$f_E^X = \frac{k \cdot (1 - k^N)}{1 - k}$$

$$f_a = \begin{cases} \text{si } WACC \neq 0: \frac{WACC \cdot (1 + WACC)^N}{(1 + WACC)^N - 1} \\ \text{si } WACC = 0: \frac{1}{N} \end{cases}$$

Los términos de las ecuaciones anteriores significan lo siguiente:

- WACC (Weighted Average Cost of Capital): es la tasa de interés a la que una empresa se financia, o el retorno mínimo que debe tener un proyecto o inversión para que una empresa invierta. Para este trabajo se asume un WACC igual a cero al tratarse de un proyecto con un objetivo social y que no busca sacar un rendimiento económico de la inversión.
- r: es la tasa a la que se espera que crezcan los costes. En este caso es la tasa a la que se espera que crezca el precio del mantenimiento y del gas. Para este proyecto se ha asumido una tasa de crecimiento de un 5% anual, tanto para los costes de mantenimiento como para los de la energía.

- N: es la duración prevista del proyecto. Se ha tomado de 20 años.
- Factor de acumulación ( $f_E$ ): acumula a lo largo de la vida del proyecto el valor futuro anual del flujo inicial, descontándolo al tiempo presente.
- Factor de amortización ( $f_a$ ): es una herramienta que se utiliza para poder repartir la amortización de una inversión uniformemente durante todo el tiempo de vida del proyecto.

Con la suma de todos los términos podemos calcular el LCOH final:

$$LCOH[\text{€/MWh}] = LC_{Bombas} + LC_{Gas} + LC_{Mantenimiento}$$

### 3.4 Agua Caliente Sanitaria

Como ha sido mencionado anteriormente la bomba de calor aerotérmica accionada mediante un motor de gas ofrece una gran oportunidad con respecto a otro tipo de bombas de calor, ya que permite aprovechar el calor generado en el motor para otros fines. Por lo general el calor generado por el motor puede ser utilizado para aumentar el rendimiento de la máquina, para realizar el desescarche sin necesidad de invertir el ciclo de la bomba de calor o para calentar agua caliente sanitaria.

En este proyecto se considera usar el calor generado en el motor para calentar el agua necesaria para cubrir las necesidades de agua caliente sanitaria del bloque de viviendas<sup>1</sup>. La bomba de calor no será utilizada en ningún momento únicamente para cubrir las necesidades de agua caliente sanitaria, solo se aprovechará el calor cuando la bomba

---

<sup>1</sup> El uso para el desescarche está también contemplado en el modelo, pues en las tablas empleadas el calor del motor no estaba disponible para temperaturas ambiente muy bajas.

este generando calor para la climatización del edificio. Como el funcionamiento de las bombas de calor no es constante se propone la instalación de unos tanques que almacenen el agua caliente generada. Estos tanques serán únicamente capaces de almacenar el agua caliente como máximo durante el día en el que fue generado. Esta restricción se debe a que los almacenes no son capaces de conservar el calor indefinidamente. Por otra parte, el espacio para los tanques no siempre es grande.



*Figura 19: Tanques de almacenamiento de ACS.*

Habiendo caracterizado ya la producción energía para agua caliente sanitaria según el funcionamiento, ahora se debe conocer la demanda de agua caliente sanitaria según la zona climatológica. La demanda energética para generar el agua caliente va en parte determinada por la temperatura del agua de la red de distribución. Para las zonas estudiadas la temperatura del agua de red es la dada en la Tabla 25.

| Mes     | A4 (°C) | D3 (°C) | E1 (°C) |
|---------|---------|---------|---------|
| Enero   | 12      | 8       | 6       |
| Febrero | 12      | 8       | 6       |
| Marzo   | 13      | 10      | 8       |

|                   |    |    |    |
|-------------------|----|----|----|
| <b>Abril</b>      | 14 | 12 | 9  |
| <b>Mayo</b>       | 16 | 14 | 12 |
| <b>Junio</b>      | 18 | 17 | 14 |
| <b>Julio</b>      | 20 | 20 | 16 |
| <b>Agosto</b>     | 21 | 19 | 16 |
| <b>Septiembre</b> | 19 | 17 | 15 |
| <b>Octubre</b>    | 17 | 13 | 11 |
| <b>Noviembre</b>  | 14 | 10 | 8  |
| <b>Diciembre</b>  | 12 | 8  | 6  |

*Tabla 25: Temperaturas del agua de red.*

La demanda térmica también viene definida por la cantidad de agua demanda y por las condiciones a las que se debe llevar esta agua, recogidas en la Tabla 26.

| <b>Variable</b>                         | <b>Valor</b>                    |
|---|---------------------------------|
| <b>Número de vecinos por superficie</b> | 2,5 personas/100m <sup>2</sup>  |
| <b>Demanda diaria de ACS</b>            | 28 dm <sup>3</sup> /persona·día |
| <b>Calor específico del agua</b>        | 4,18 kJ/kg·K                    |
| <b>Temperatura objetivo ACS</b>         | 60°C                            |

*Tabla 26: Valores para el cálculo de la demanda de ACS.*

Con los datos anteriores se obtiene la demanda térmica para preparar el ACS a 60°C:

$$Demanda = \frac{\text{Área}_{\text{edificio}} \cdot 2,5 \cdot c_e \cdot 28 \cdot (60 - T_{red})}{100}$$

Es importante recordar que el resultado de esta ecuación está en unidades de energía mientras que la ecuación obtenida mediante la caracterización de la bomba está en

unidades de potencia, por lo que habrá que multiplicar por el tiempo para comparar la energía demandada con la producida.

### 3.5 Energía primaria

El Código Técnico de Edificación impone ciertas limitaciones en cuanto a la cantidad de energía que necesita ser utilizada para calentar un espacio. La razón de ello es reducir el consumo energético y aumentar la eficiencia de los equipos instalados. Para calcular la energía primaria consumida se utilizarán los factores de conversión de energía final a energía primaria y los factores de emisión de CO<sub>2</sub> proporcionados por el Código Técnico, dados en las Tablas 27 y 28. [CTE09]

| Factores de emisiones de CO <sub>2</sub>  |        |                                  |                                  |
|---|--------|----------------------------------|----------------------------------|
|   | Fuente | Valores aprobados                | Valores previos (***)            |
|   |        | kg CO <sub>2</sub> /kWh E. final | kg CO <sub>2</sub> /kWh E. final |
| Electricidad convencional Nacional        | (*)    | 0,357                            |                                  |
| Electricidad convencional peninsular      | (**)   | 0,331                            | 0,649                            |
| Electricidad convencional extrapeninsular | (**)   | 0,833                            | 0,981                            |
| Electricidad convencional Baleares        | (**)   | 0,932                            |                                  |
| Electricidad convencional Canarias        | (**)   | 0,776                            |                                  |
| Electricidad convencional Ceuta y Melilla | (**)   | 0,721                            |                                  |
| Gasóleo calefacción                       | (***)  | 0,311                            | 0,287                            |
| GLP                                       | (***)  | 0,254                            | 0,244                            |
| Gas natural                               | (***)  | 0,252                            | 0,204                            |
| Carbón                                    | (***)  | 0,472                            | 0,347                            |
| Biomasa no densificada                    | (***)  | 0,018                            | neutro                           |
| Biomasa densificada (pelets)              | (***)  | 0,018                            | neutro                           |

Tabla 27: Tabla con los factores de emisión para los distintos combustibles.

| Factores de conversión de energía final a primaria |        |  |   |                                    |                              |
|--|--------|--|---|------------------------------------|------------------------------|
|  | Fuente | Valores aprobados                      |   |                                    | Valores previos (****)       |
|  |        | kWh E.primaria renovable /kWh E. final | kWh E.primaria no renovable /kWh E. final | kWh E.primaria total /kWh E. final | kWh E.primaria /kWh E. final |
| Electricidad convencional Nacional                 | (*)    | 0,396                                  | 2,007                                     | 2,403                              |                              |
| Electricidad convencional peninsular               | (**)   | 0,414                                  | 1,954                                     | 2,368                              | 2,61                         |
| Electricidad convencional extrapeninsular          | (**)   | 0,075                                  | 2,937                                     | 3,011                              | 3,35                         |
| Electricidad convencional Baleares                 | (**)   | 0,082                                  | 2,968                                     | 3,049                              |                              |
| Electricidad convencional Canarias                 | (**)   | 0,070                                  | 2,924                                     | 2,994                              |                              |
| Electricidad convencional Ceuta y Melilla          | (**)   | 0,072                                  | 2,718                                     | 2,790                              |                              |
| Gasóleo calefacción                                | (***)  | 0,003                                  | 1,179                                     | 1,182                              | 1,08                         |
| GLP  | (***)  | 0,003                                  | 1,201                                     | 1,204                              | 1,08                         |
| Gas natural  | (***)  | 0,005                                  | 1,190                                     | 1,195                              | 1,01                         |
| Carbón   | (***)  | 0,002                                  | 1,082                                     | 1,084                              | 1,00                         |
| Biomasa no densificada                             | (***)  | 1,003                                  | 0,034                                     | 1,037                              |                              |
| Biomasa densificada (pelets)                       | (***)  | 1,028                                  | 0,085                                     | 1,113                              |                              |

Tabla 28: Tabla con los factores de conversión de energía final a primaria.

Con esta información se calculan los coeficientes de paso de energía final a energía primaria.

$$k_{EPNR} = 1,190 \text{ kWh EPNR/kWh} \cdot \frac{201,53 \text{ g CO}_2/\text{kWh EP}}{252 \text{ g CO}_2/\text{kWh EF}} = 0,952 \text{ kWh EPNR} / \text{kWh} - \text{PCI}$$

$$k_{EPTot} = 1,195 \text{ kWh EPNR/kWh} \cdot \frac{201,53 \text{ g CO}_2/\text{kWh EP}}{252 \text{ g CO}_2/\text{kWh EF}} = 0,956 \text{ kWh EPT} / \text{kWh} - \text{PCI}$$

Con estos factores de conversión se pueden convertir las energías finales calculadas en energías primarias. Las energías primarias calculadas se han de comparar con los límites siguientes fijado por el Código Técnico (Tablas 29 y 30).

**Tabla 3.2.a - HE0**  
**Valor límite  $C_{ep,tot,lim}$  [kW·h/m<sup>2</sup>·año] para uso residencial privado**

|  | Zona climática de invierno |    |    |    |     |     |
|--|----------------------------|----|----|----|-----|-----|
|  | $\alpha$                   | A  | B  | C  | D   | E   |
| <b>Edificios nuevos y ampliaciones</b>                 | 40                         | 50 | 56 | 64 | 76  | 86  |
| <b>Cambios de uso a residencial privado y reformas</b> | 55                         | 75 | 80 | 90 | 105 | 115 |

En territorio extrapeninsular (Illes Balears, Canarias, Ceuta y Melilla) se multiplicarán los valores de la tabla por 1,15

*Tabla 30: Límites de consumo de energía primaria total según la zona climatológica[CTE09].*

**Tabla 3.1.a - HE0**  
**Valor límite  $C_{ep,nren,lim}$  [kW·h/m<sup>2</sup>·año] para uso residencial privado**

|  | Zona climática de invierno |    |    |    |    |    |
|--|----------------------------|----|----|----|----|----|
|  | $\alpha$                   | A  | B  | C  | D  | E  |
| <b>Edificios nuevos y ampliaciones</b>                 | 20                         | 25 | 28 | 32 | 38 | 43 |
| <b>Cambios de uso a residencial privado y reformas</b> | 40                         | 50 | 55 | 65 | 70 | 80 |

En territorio extrapeninsular (Illes Balears, Canarias, Ceuta y Melilla) se multiplicarán los valores de la tabla por 1,25

*Tabla 29: Límites de consumo de energía primaria no renovable según la zona climática[CTE09]*

## 4 RESULTADOS

Dado que este proyecto es continuación de otro similar que empleaba una bomba de calor eléctrica [PRIE20], los resultados serán comparados con los del primero. Las Figuras 20 a 22 representan los valores del LCOH obtenidos en las zonas climáticas D3, A4 y E1, para la superficie máxima que podían cubrir las configuraciones de bombas de calor ensayadas (1 de 75 kW y 1 de 25 kW; 2 de 75 kW y 1 de 25 kW; 3 de 75 kW y 1 de 25 kW y 4 de 75 kW y 1 de 25 kW). De las Figuras anteriores se deduce que los valores de LCOH varían bastante de zona climática en zona climática, alcanzando valores inferiores en las zonas donde hay mayor demanda de calefacción. Esto es debido a que según se aumenta la demanda cubierta aumenta el denominador en la fórmula del LCOH. También se observa una tendencia generalizada a que el LCOH disminuya según aumenta el porcentaje relativo de máquinas de 75 kW, debido principalmente a que la bomba de 75 kW ofrece un rendimiento superior a la bomba de 25 kW. Pese a todo, en ninguno de los casos estudiados se alcanza el mismo LCOH que el obtenido al utilizar una bomba de calor accionada eléctricamente (92,2€/MWh), siendo superior en el caso de la bomba con motor a gas.

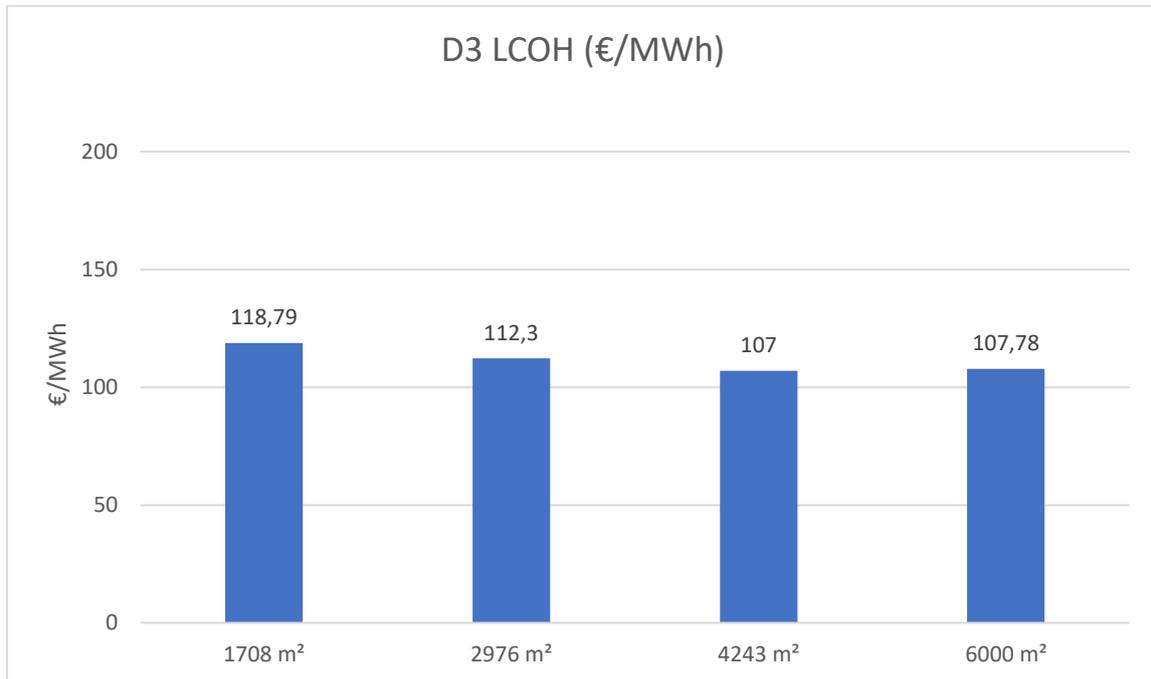


Figura 20: LCOH zona D3 solamente calefacción.

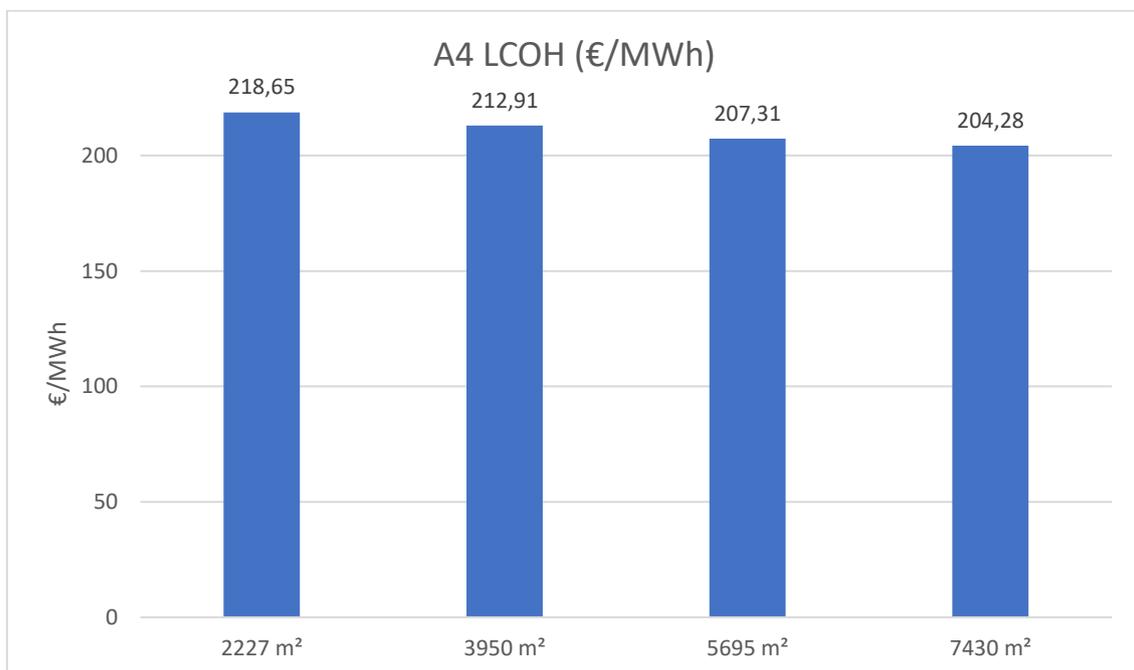
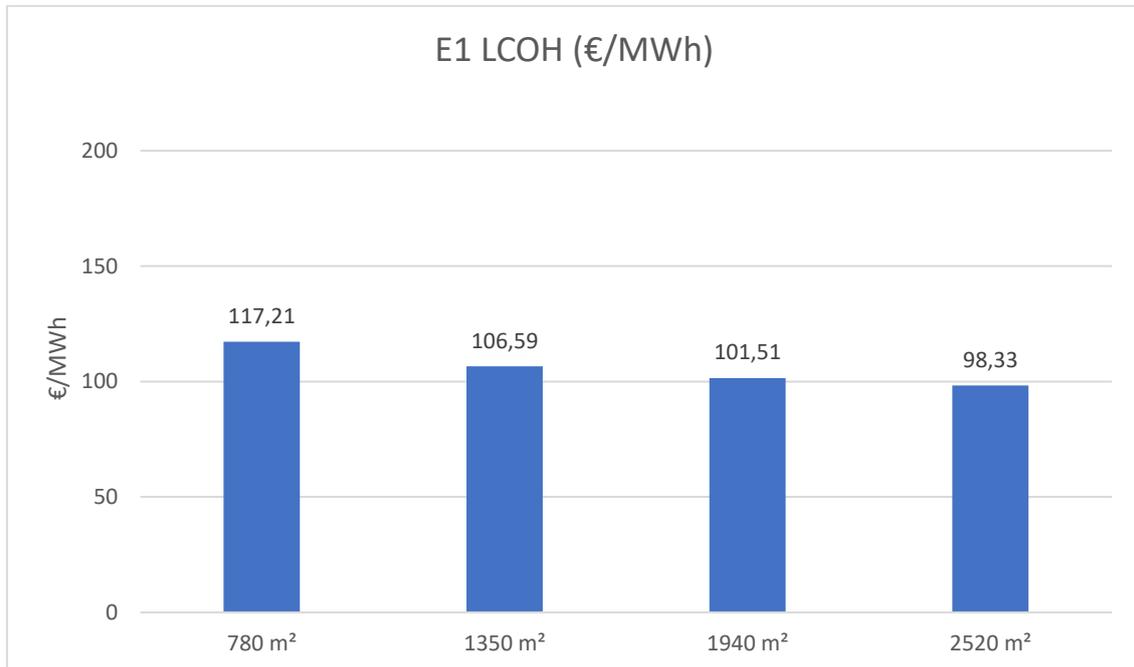


Figura 21: LCOH zona A4 solo calefacción.



*Figura 22: LCOH zona E1 solo calefacción.*

En estos primeros resultados no se ha aprovechado la recuperación del calor del motor para la producción de ACS. Las Figuras 23 a 25 contemplan tanto esta posibilidad como la producción de frío en verano. De las Figuras anteriores se desprende que incrementar el uso de las bombas de calor reduce significativamente el valor de LCOH hasta casi alcanzar el LCOH de una caldera central (73,54€/MWh) que es la tecnología disponible más barata. Es destacable la gran reducción que se consigue en el LCOH para el clima A4, donde el LCOH cae hasta un 65% si se considera la producción de frío. Esta gran reducción del LCOH se debe a que se deja de disipar una energía que ya estaba proporcionando el motor y se está aprovechando. Cabe también destacar que el descenso del LCOH no es tan significativo en la zona E1 debido a que al ser sus inviernos más fríos una vez se alcanzan ciertas temperaturas el calor del motor es usado para el descharchado por lo que no hay tanta energía disponible para el agua caliente sanitaria.

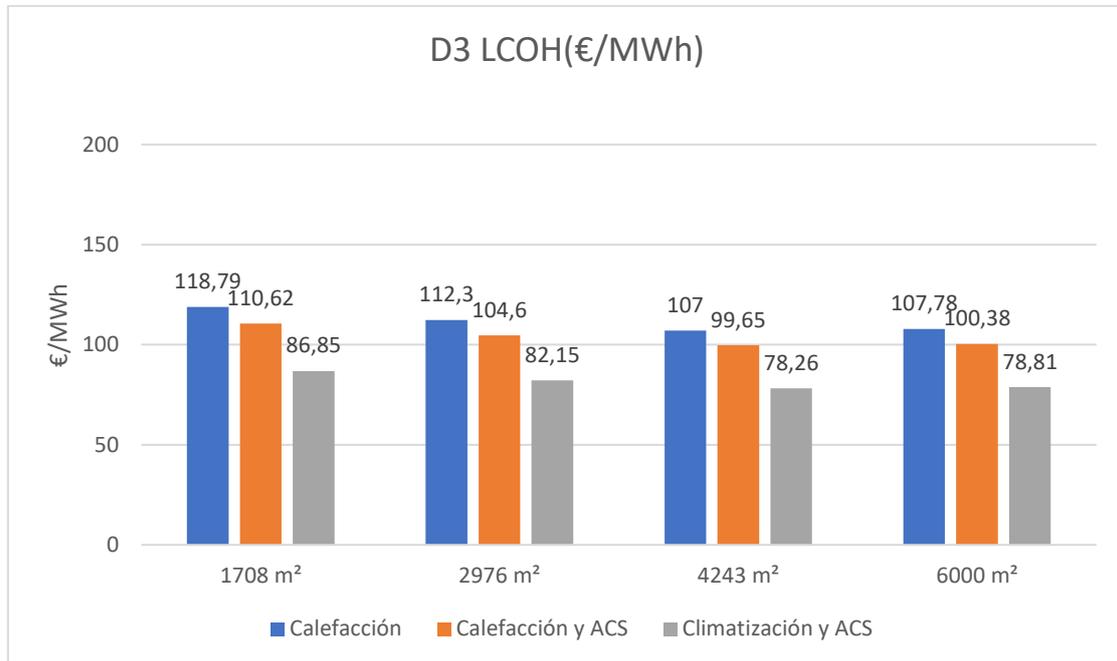


Figura 23: LCOH zona D3 con ACS.

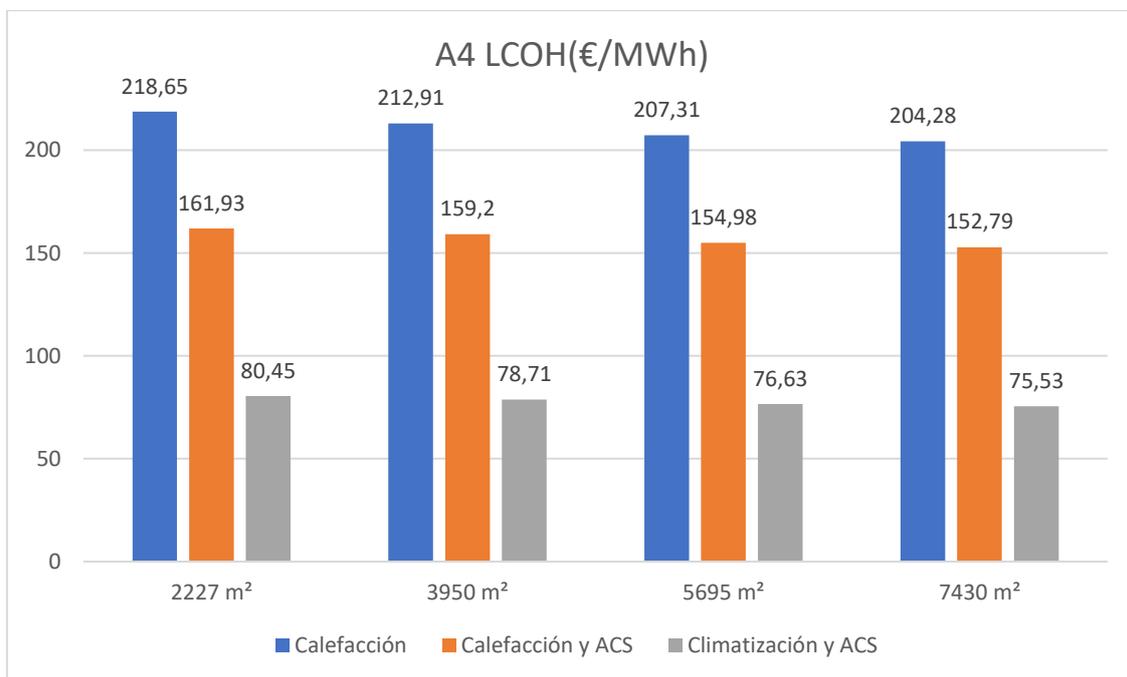


Figura 24: LCOH zona A4 con ACS.

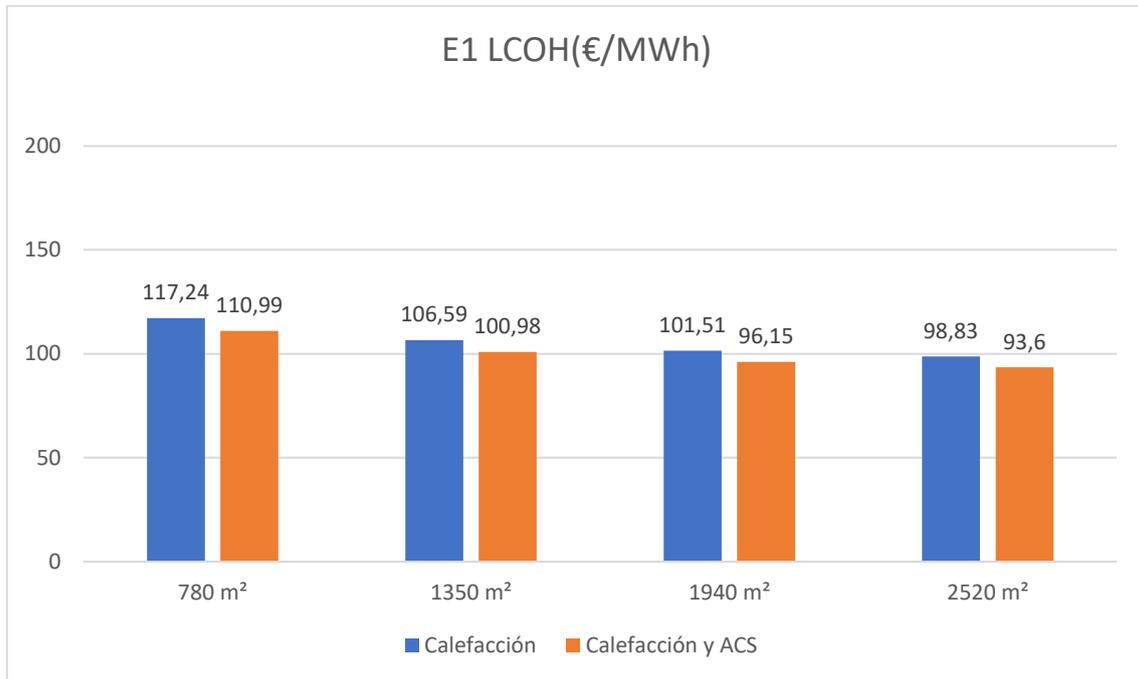


Figura 25: LCOH zona E1 con ACS.

Es tal la potencia generada por el motor que cubre de sobra las necesidades de agua caliente sanitaria del edificio. Es por ello que se plantea la posibilidad de aprovechar el calor excedente para proporcionar agua caliente sanitaria a edificios próximos. Si se decidiese aprovechar la totalidad del calor generado por el motor para generar agua caliente sanitaria los LCOH serían los dados en las Figuras 26 a 28. Como se puede observar, el descenso del LCOH es aún mayor, obteniendo valores de LCOH inferiores a los que proporciona una caldera central (73,54€/MWh). Esto se debe a la recuperación total del calor disponible del motor. Es suficientemente relevante la caída del LCOH debido al aprovechamiento completo del calor del motor de gas que se debiera considerar a la hora de diseñar la instalación.

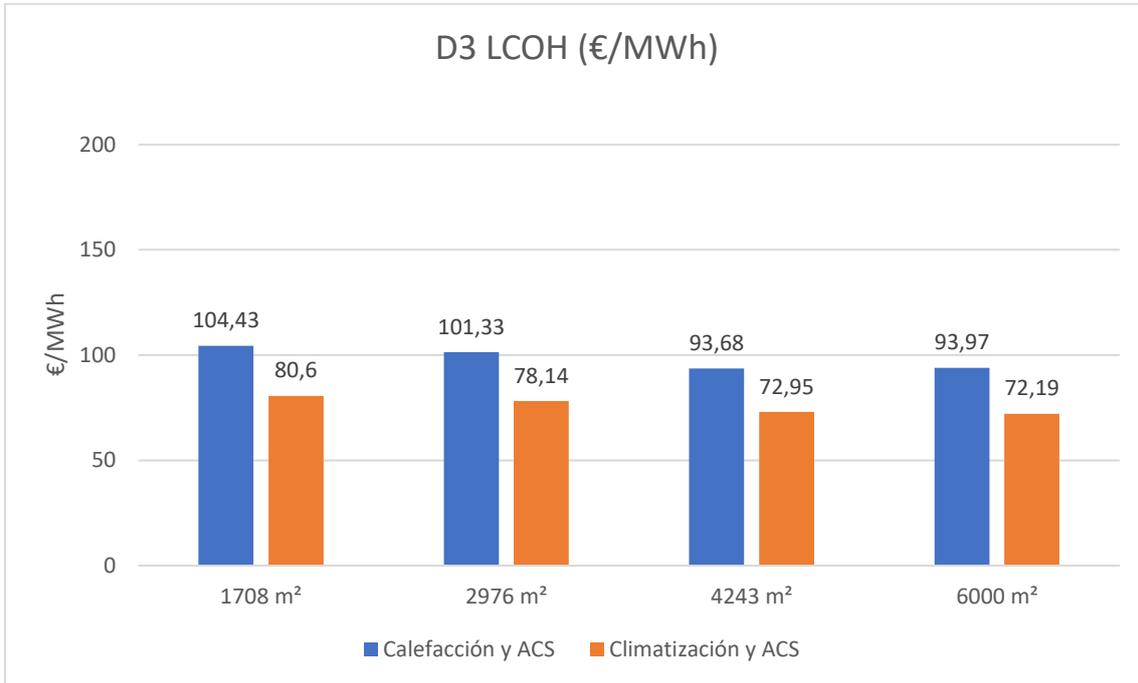


Figura 26: LCOH zona D3 con ACS y aprovechando toda la energía del motor.

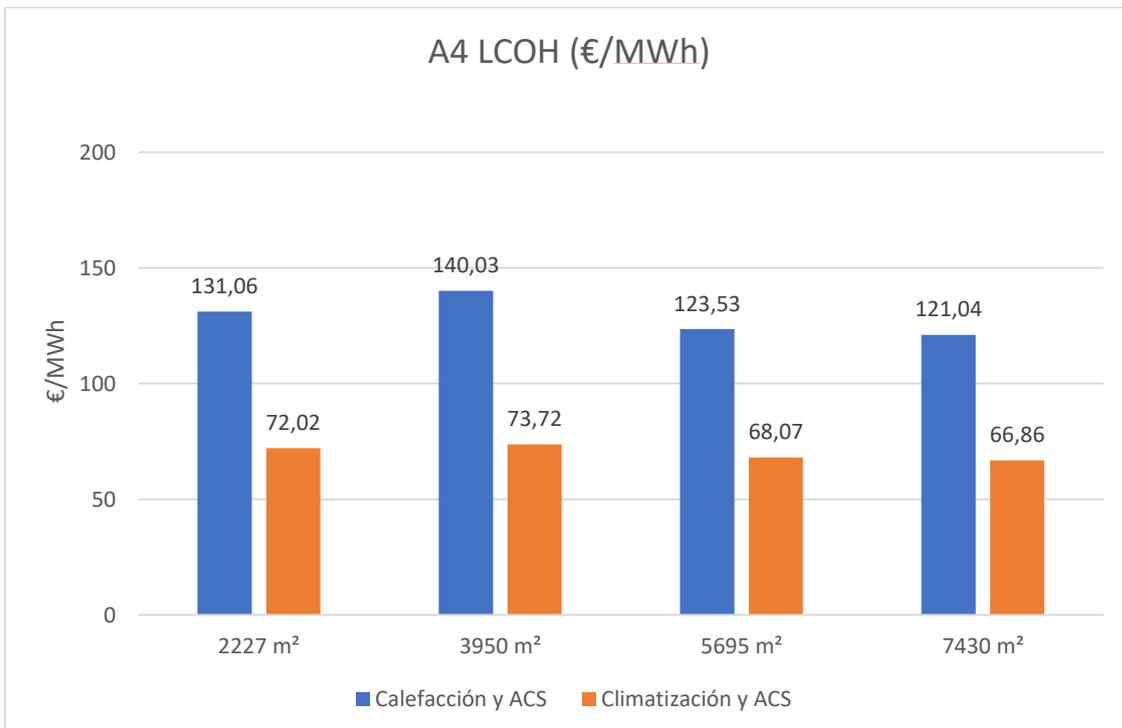


Figura 27: LCOH zona A4 con ACS y aprovechando toda la energía del motor.

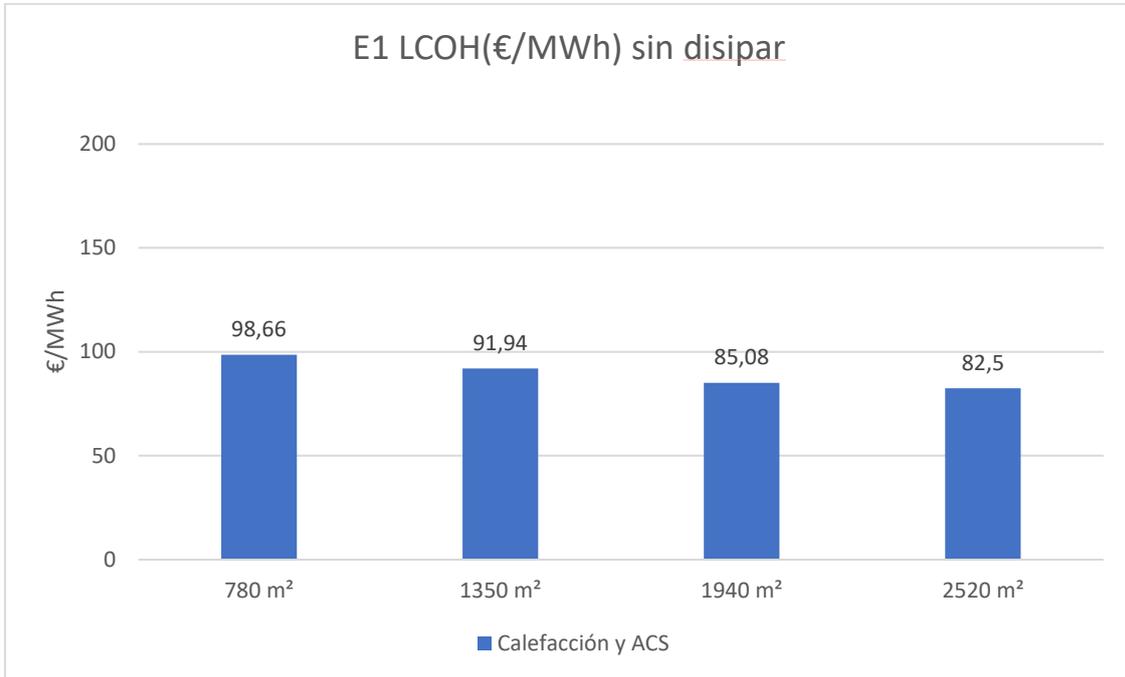
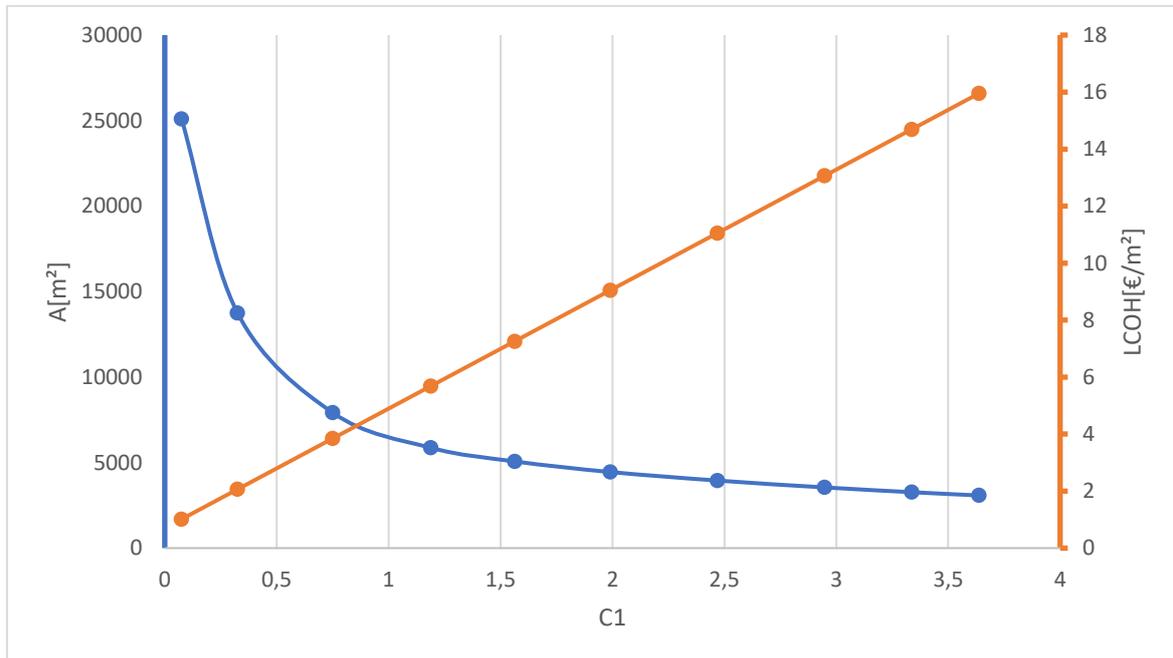


Figura 28: LCOH zona E1 con ACS y aprovechando toda la energía del motor.



*Figura 29: Relación entre el aislamiento (C1), el área climatizada y el LCOH por m<sup>2</sup> para un LCOH de 78,25€/MWh y 3 bombas de 75 kW y una de 25 kW.*

En la Figura 29 se observan los efectos del aislamiento sobre la superficie que podría ser cubierta y el LCOH por m<sup>2</sup> manteniendo un valor fijo de LCOH (78,25€/MWh) para una configuración de 3 bombas de 75 kW y una de 25 kW. Como se puede observar, el aislamiento térmico de un edificio puede ser crítico a la hora de hacer una instalación de climatización, tanto a nivel de dimensionamiento como de costes.

Por último, se procede a analizar el cumplimiento de las restricciones del consumo de energía primaria total y no renovable establecidas en el Código Técnico de la Edificación para el caso óptimo, es decir, aprovechamiento de todo el calor del motor (mediante la cesión de calor para el ACS a edificios colindantes).

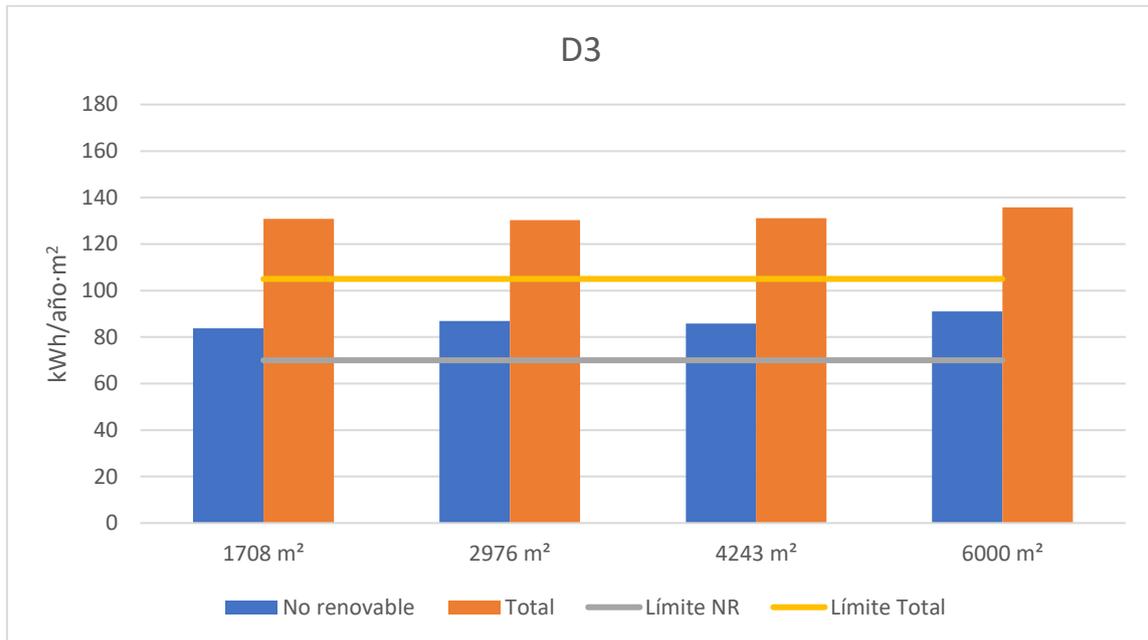


Figura 30: Consumo de energía primaria en la zona D3.

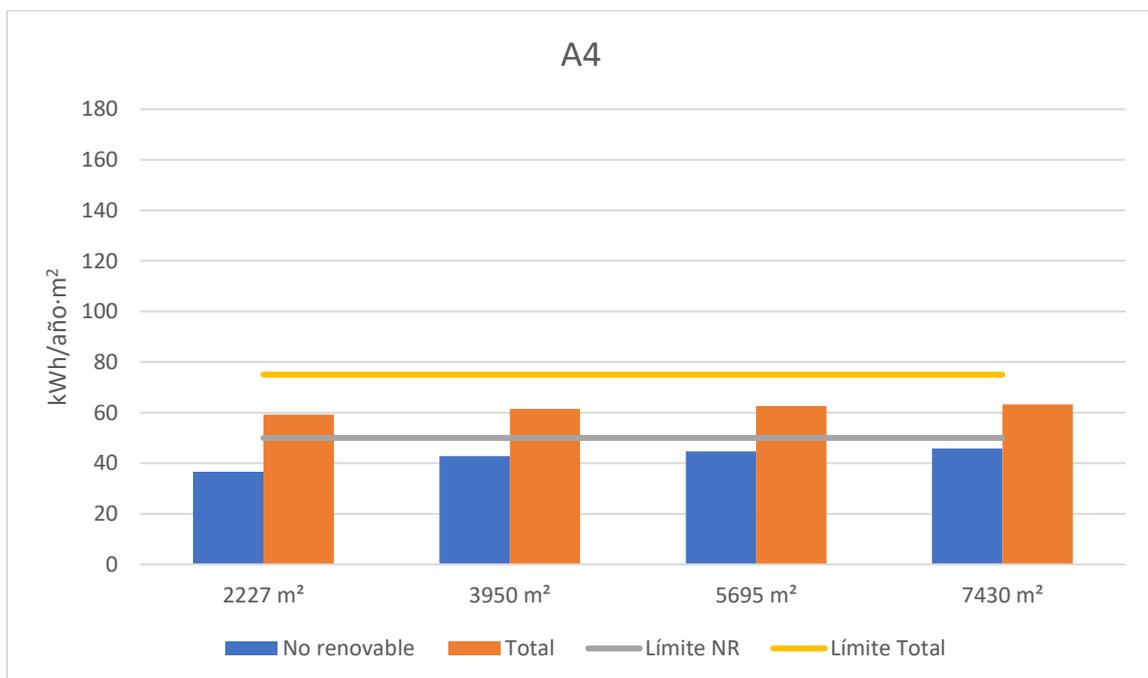
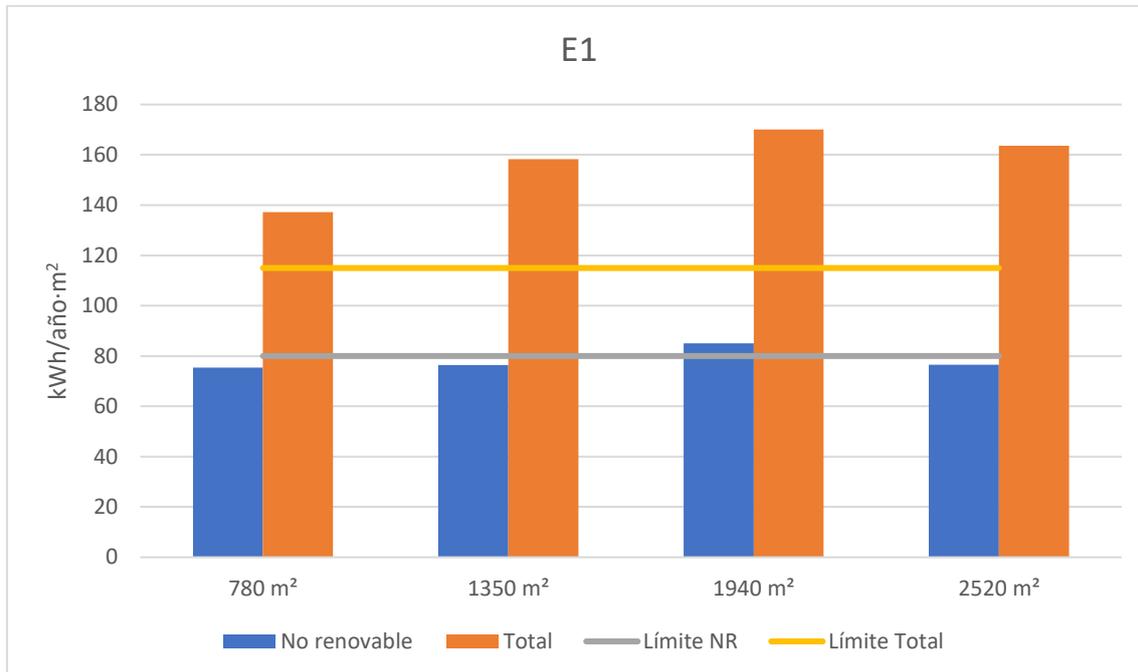


Figura 31: Consumo de energía primaria en la zona A4.



*Figura 32: Consumo de energía primaria en la zona E1.*

Como se observa en las Figuras 30 a 32, salvo para la zona climática A4 los requisitos de consumo de energía primaria no se cumplen. El límite que suele ser rebasado principalmente es el límite de energía prima total. Esto puede deberse a que el aislamiento del edificio no es suficientemente adecuado. Al estar enmarcado el cambio de equipos de climatización en el marco de una reforma y al tender cada vez los requisitos a una mayor eficiencia, se recomienda realizar una reforma para mejorar el aislamiento térmico del edificio. Por ello se ha analizado el efecto del aislamiento térmico en el consumo de energía primaria (total y no renovable) en un edificio de 2.500 m<sup>2</sup>. Una vez fijada la superficie a climatizar, se irán alterando los valores del aislamiento térmico según los valores de la Tabla 31 y se buscará la mejor configuración de bombas posible, mostrándose los resultados en las Figuras 33 a 35.

| Zona Climática Invierno | Tipo vivienda | C1    |       |       |        |        |        |         |        |       |       |
|-------------------------|---------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|--------|-------|-------|
|                         |               | A     | B     | C     | D alta | D baja | E alta | E media | E baja | F     | G     |
| A                       | Bloque        | 0,075 | 0,325 | 0,750 | 1,188  | 1,563  | 2,122  | 2,866   | 3,611  | 4,169 | 4,541 |
| B                       | Bloque        | 0,075 | 0,325 | 0,750 | 1,188  | 1,563  | 2,062  | 2,686   | 3,310  | 3,791 | 4,131 |
| C                       | Bloque        | 0,075 | 0,325 | 0,750 | 1,188  | 1,563  | 2,013  | 2,539   | 3,065  | 3,484 | 3,797 |
| D                       | Bloque        | 0,075 | 0,325 | 0,750 | 1,188  | 1,563  | 1,990  | 2,469   | 2,948  | 3,337 | 3,637 |
| E                       | Bloque        | 0,075 | 0,325 | 0,750 | 1,188  | 1,563  | 1,978  | 2,434   | 2,890  | 3,264 | 3,558 |
| A                       | Unifamiliar   | 0,075 | 0,325 | 0,750 | 1,188  | 1,563  | 1,975  | 2,426   | 2,876  | 3,561 | 4,480 |
| B                       | Unifamiliar   | 0,075 | 0,325 | 0,750 | 1,188  | 1,563  | 1,974  | 2,421   | 2,869  | 3,476 | 4,244 |
| C                       | Unifamiliar   | 0,075 | 0,325 | 0,750 | 1,188  | 1,563  | 1,981  | 2,443   | 2,906  | 3,432 | 4,021 |
| D                       | Unifamiliar   | 0,075 | 0,325 | 0,750 | 1,188  | 1,563  | 1,963  | 2,390   | 2,816  | 3,315 | 3,887 |
| E                       | Unifamiliar   | 0,075 | 0,325 | 0,750 | 1,188  | 1,563  | 2,005  | 2,516   | 3,027  | 3,611 | 4,266 |

Tabla 31: Tabla con los valores de C1 según la calificación energética

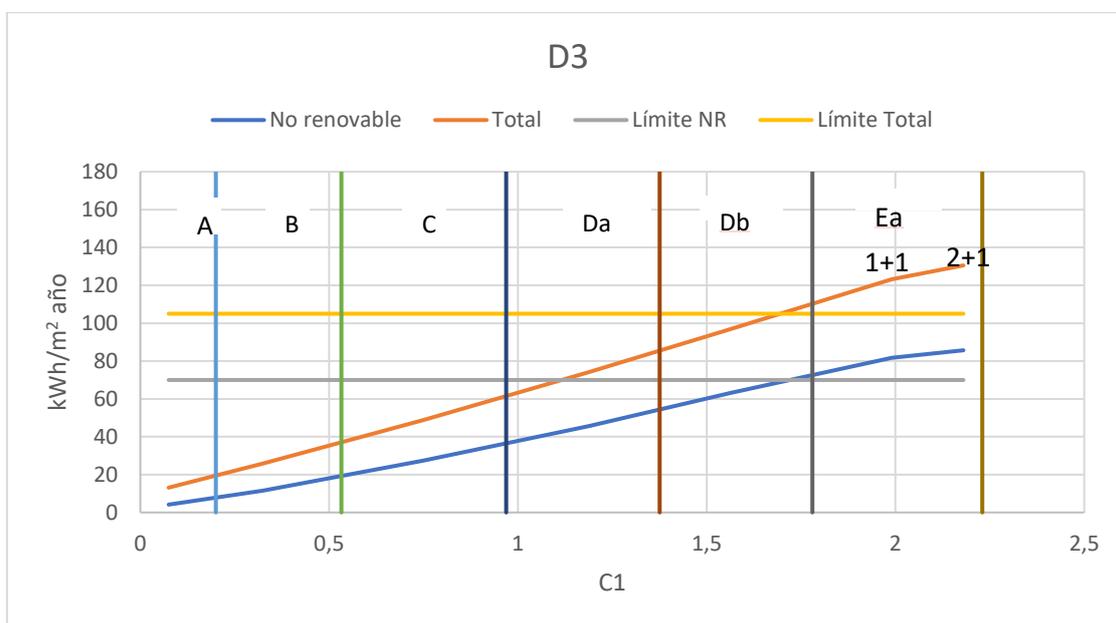


Figura 33: Variación del consumo de energía primaria según los valores de C1 en la zona D3.

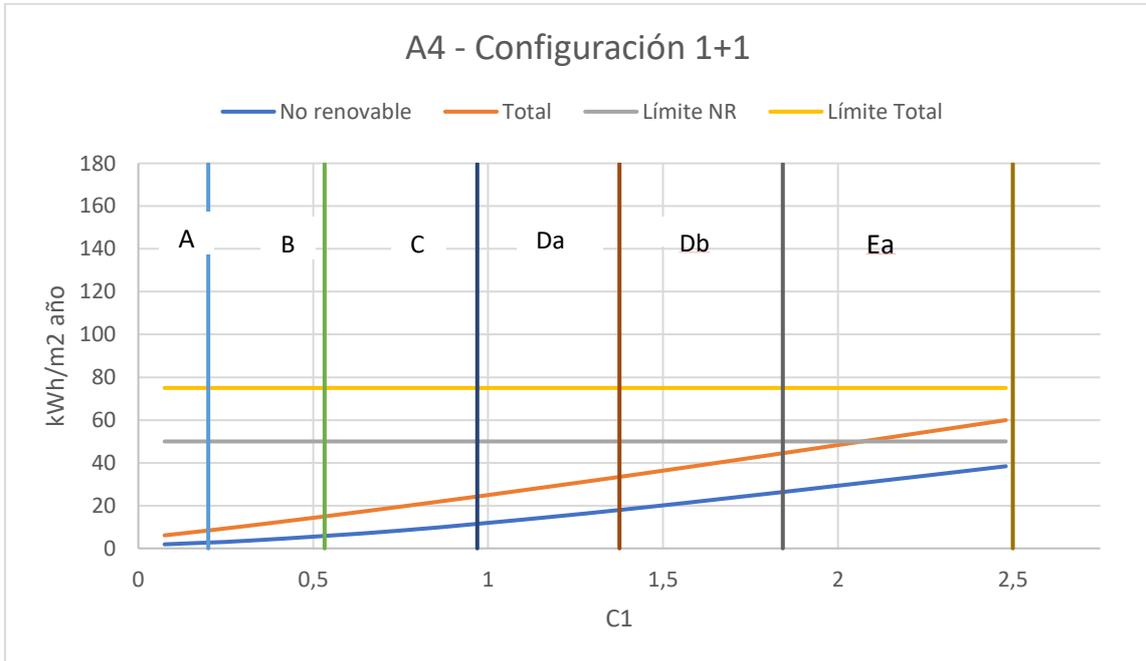


Figura 34: Variación del consumo de energía primaria según los valores de C1 zona A4 configuración 75 kW + 25 kW.

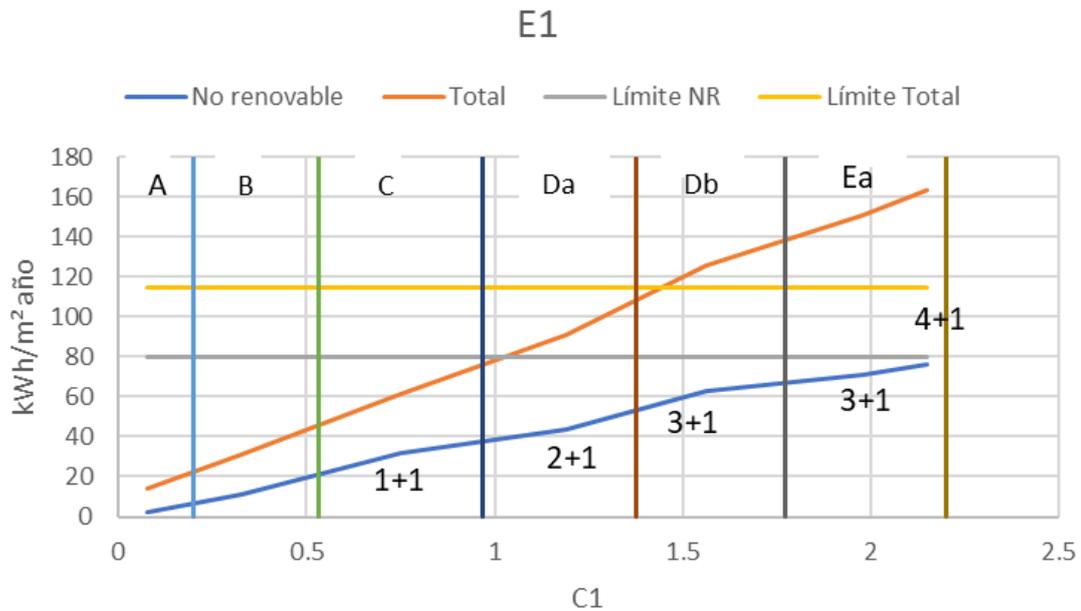


Figura 35: Variación del consumo de energía primaria según los valores de C1 en la zona E1.

Se observe que la mejora del aislamiento requerido no es tan drástica, siendo fácilmente alcanzable el requisito demandado por el Código Técnico. También es interesante observar que para las mismas configuraciones de bombas el descenso de la energía primaria requerida presenta una pendiente constante según mejora el aislamiento.

Debe destacarse que, aunque los criterios de consumo de energía primaria pueden cumplirse con una pequeña mejora del aislamiento, **las configuraciones planteadas no respetan el criterio establecido por el Código Técnico de contribución renovable in situ mínima para la preparación del ACS**. En este proyecto la energía aerotérmica se ha dedicado íntegramente a la calefacción, mientras que el ACS se ha preparado íntegramente a partir del calor recuperado del motor, aplicación que se podría considerar de cogeneración, pero al no ser ésta de origen renovable (emplea gas natural) no cumple la restricción. Incluso si el gas natural se sustituyese por biometano u otro gas renovable, al no estar producido in situ, no sería válido. El procedimiento sólo sería válido si el motor emplease biomasa sólida. Esto es algo ciertamente polémico del Código Técnico, siendo el presente proyecto un ejemplo claro de cómo esta normativa, en su estado actual, limita la aplicación de medidas eficientes.

## 5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado un estudio sobre la viabilidad técnica y económica del uso de la bomba de calor aire/agua accionada mediante un motor de gas para bloques de vivienda. El sistema de bomba de calor está diseñado para que proporcione calor en invierno, frío en verano y agua caliente sanitaria. La implementación de este sistema se basa en que los radiadores de los edificios están sobredimensionados y que podrían ser usados para proporcionar el frío y calor sin afectar a la eficiencia del sistema.

Para poder realizar el análisis de la viabilidad técnica y económica se ha tenido que hacer un estudio de la demanda térmica de los edificios según la zona climática en la que se encuentren y el aislamiento del térmico del edificio. A su vez también se han obtenido las ecuaciones que rigen el funcionamiento de las bombas de calor utilizadas, lo que ha permitido analizar cuáles son los efectos que tienen ciertas variables en las salidas de la bomba. Con toda esta información, se ha podido desarrollar un sistema para la activación de las bombas que permite casar la demanda con la producción de las bombas. Además, se ha determinado la demanda de agua caliente sanitaria que tenían los distintos edificios estudiados para poder ver que parte podría ser suministrada por las bombas de calor.

Con todo ello se ha realizado un estudio económico para todos los casos estudiados. Se ha podido ver que a medida que se incrementa el uso de la bomba de calor aerotérmica accionada mediante gas natural disminuye el LCOH. Se ha observado que la mejor configuración de uso es la de utilizar la bomba de calor para proporcionar climatización durante todo el año y agua caliente sanitaria. Analizando la potencia térmica disipada por el motor se ha visto que además de la demanda propia del edificio de agua caliente

sanitaria tiene un excedente de energía que podría ser utilizado para proporcionar calor para el ACS a otro edificio. Con los resultados finales del análisis del LCOH se puede asegurar que la bomba de calor aerotérmica accionada por gas es una opción más interesante económicamente con respecto a la bomba eléctrica ya que tiene un LCOH inferior y que casi alcanza los valores de la caldera central que es el sistema más económico (73,54€/MWh), siempre que se emplee para calefacción, refrigeración y ACS.

En cuanto al análisis de la energía primaria consumida por la instalación, se ha podido ver que simplemente con el cambio del sistema de climatización se rebasan los límites máximos fijados. Es por ello que se recomienda realizar una rehabilitación exprés para poder cumplir con los requisitos fijados. Las rehabilitaciones exprés proporcionan una mejora del aislamiento térmico a bajo coste y sin necesidad de grandes reformas.

Por último, y pese a los buenos resultados tanto técnicos como económicos logrados, se ha de advertir que el diseño propuesto no cumple con las restricciones del Código Técnico sobre contribución mínima de renovable in situ a la preparación del ACS. Para que pudiese cumplir, sería preciso que el motor en lugar de con gas natural se alimentase con biomasa sólida (no sería válido reemplazar el gas natural por cualquier cas renovable).

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [ACNU17] ACNUR. “ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU”. Junio 2017. [https://eacnur.org/es/actualidad/noticias/entidades-publicas/ods-objetivos-de-desarrollo-sostenible-de-la-onu?&tc alt=47342&n o pst=n o pst&n okw= b 1t1 c 5269393816 0&gclid=CjwKCAiAj-\\_xBRBjEiwAmRbqYj6lnBhLAWtONuCFmtbSUsEyMfIXZG\\_ed9D\\_vPoM6\\_gduUJrNIKb9xoCllgQAvD\\_BwE](https://eacnur.org/es/actualidad/noticias/entidades-publicas/ods-objetivos-de-desarrollo-sostenible-de-la-onu?&tc alt=47342&n o pst=n o pst&n okw= b 1t1 c 5269393816 0&gclid=CjwKCAiAj-_xBRBjEiwAmRbqYj6lnBhLAWtONuCFmtbSUsEyMfIXZG_ed9D_vPoM6_gduUJrNIKb9xoCllgQAvD_BwE)
- [AFEC21] Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización. “Bomba de Calor, Beneficiosa para ti y para el Planeta”. 2021. <https://www.bombadecolor.org/>
- [AMBI21] Asociación de Ciencias Ambientales “¿Qué es la pobreza energética?”. 2021. <https://www.cienciasambientales.org.es/index.php/ique-es-la-pobreza-energetica>
- [ARNA15] Arnabat, A. “Funcionamiento de la bomba de calor para calefacción y agua caliente”. Septiembre 2015. <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/bomba-de-calor.html>
- [ARNA16] Arnabat, A. “Calderas de condensación: ventajas e inconvenientes”. 2016. <https://blog.caloryfrio.com/calderas-condensacion-ventajas-e-inconvenientes/>
- [ARNA21] Arnabat, I. “Redes de Energía de Distrito: un buen equilibrado hidráulico es la clave de la eficiencia”. Diciembre 2019. <https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/redes-de-energia-de-distrito-un-buen-equilibrado-hidraulico-es-la-clave-de-la-eficiencia.html>

- [BARR20] Barrella, R., Priego, R., Linares, J.I., Arenas, A., Romero, J.C., Centeno, E. *“Feasibility Study of a Centralised Electrically Driven Air Source Heat Pump Water Heater to Face Energy Poverty in Block Dwellings in Madrid (Spain)”*. Mayo 2020.
- [BARR21] Barrella, R., Linares, J.I., Romero, J.C., Arenas, E., Centeno, E. *“Does cash money solve energy poverty? Assessing the impact of household heating allowances in Spain”*. Julio 2021
- [CTE09] Código Técnico de la Edificación de España. 2009.  
<https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-documentoscte/126-ct-documentos-cte/ct-disposiciones-legislativas-01.html>
- [ENDE21] Endesa. *“Gas Estable”*. 2021.  
<https://www.endesa.com/es/empresas/gas/tarifa-gas-estable>
- [ENEL21] Enel Green Power *“La transición energética”*. 2021.  
<https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/transicion-energetica>
- [IDAE21] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. *“Redes de calor y frío”*. 2021. <https://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/edificacion/redes-de-calor-y-frio>
- [LINA16] Linares, J.I., *“Apuntes de Ingeniería Energética”*, COMILLAS-ICAI, 2016.
- [NACI21] Organización de las Naciones Unidas. *“Objetivos de desarrollo sostenible”*. 2021  
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

- [NATU21] Naturgy “*Caldera de baja temperatura*”. 2021.  
[https://www.naturgy.es/hogar/fnt\\_hogar/calderas\\_de\\_baja\\_temperatura#:~:text=La%20caldera%20de%20Baja%20Temperatura,%2C%20pudiendo%20llegar%20a%2095%25](https://www.naturgy.es/hogar/fnt_hogar/calderas_de_baja_temperatura#:~:text=La%20caldera%20de%20Baja%20Temperatura,%2C%20pudiendo%20llegar%20a%2095%25).
- [ODS7] Organización de las Naciones Unidas. Objetivos de desarrollo sostenible. “*Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna*”. 2021.  
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- [PRIEG20] Priego Peña, I. “*Análisis de viabilidad técnico-económica de la bomba de calor aerotérmica accionada eléctricamente para viviendas en bloque como medida activa contra la pobreza energética*”. Junio 2020.
- [RITE16] Documento Reconocido del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) “*Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España*”. 2016.  
[https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros%20documentos/Factores\\_emision\\_CO2.pdf](https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros%20documentos/Factores_emision_CO2.pdf)
- [TRAN19] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. “*El Gobierno aprueba la Estrategia Nacional contra la Pobreza Energética 2019-2024*”. Abril 2019. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-gobierno-aprueba-la-estrategia-nacional-contr-la-pobreza-energ%C3%A9tica-2019-2024/tcm:30-496260>
- [TRAN21] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. “*Objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero*”. 2021  
<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/objetivos.aspx>

## **7 Anexo 1 Objetivos de desarrollo sostenible de Naciones Unidas**

En el año 2015 fue presentada por Naciones Unidas una iniciativa por la cual se quería dar continuidad a los Objetivos de Desarrollo del Milenio. La iniciativa constaba de 17 objetivos y 169 metas que trataban sobre iniciativas como la pobreza, la educación, la igualdad, la salud, el medio ambiente y la innovación. La iniciativa fue aprobada por los 193 estados miembros con el compromiso de trabajar en ellos. El compromiso adquirido fue el de perseguir la consecución de las metas fijadas involucrando a gobiernos, sociedad y sector privado. [ACNU17] [NACI21]

Este trabajo se centra especialmente en buscar soluciones para uno de los Objetivos de Desarrollo sostenible, objetivo 7. Este objetivo trata de garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna. Este objetivo es clave para el desarrollo de la sociedad. Está claro que todos los seres humanos necesitan de alguna forma de energía para sobrevivir, calor para cocinar o climatizar o luz para iluminar las habitaciones. Estas necesidades energéticas están en constante aumento y existe la obligación de emplear disposiciones lo más barato posible para que el mayor número de personas pueda tener acceso a esas formas de energía final. Aunque ha habido grandes avances en este aspecto, principalmente impulsado por la reducción del coste de las energías renovables, aún hay campo de trabajo para garantizar el acceso a la energía. [ODS7]

En este aspecto las Naciones Unidas facilitan algunos datos que nos pueden ayudar a comprender mejor la situación.

- El 13% de la población mundial aún no tiene acceso a servicios modernos de electricidad.
- 3000 millones de personas dependen de la madera, el carbón, el carbón vegetal o los desechos de origen animal para cocinar y calentar la vivienda.
- La energía es el factor que contribuye principalmente al cambio climático y representa alrededor del 60% de todas las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero.
- La contaminación del aire en locales cerrados debido al uso de combustibles para la energía doméstica causó 4,3 millones de muertes en 2012, 6 de cada 10 de estas fueron mujeres y niñas.
- En 2015, el 17,5% del consumo final de energía fue de energías renovables.

Las metas que van asociadas a la consecución de este objetivo antes de 2030 son las siguientes:

- Garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos.
- Aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas.
- Duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética.
- Aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias.
- Ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en

particular los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo.

Este proyecto al estar enfocado en la lucha contra la pobreza energética se alinea perfectamente con la consecución del objetivo de desarrollo sostenible número 7. Se intenta proporcionar a gente con pocos recursos con una fuente de energía que pueda satisfacer sus necesidades a un precio razonable.

Los principales aspectos en los que la bomba de calor aerotérmica accionada mediante un motor de gas natural supone un avance en este objetivo son los siguientes:

- Tiene la capacidad de proporcionar una energía barata que puede cubrir múltiples necesidades energéticas. La bomba de calor a gas es capaz de proporcionar energía de climatización y para el agua caliente sanitaria a un precio similar a la tecnología más barata la caldera central de gas.
- Proporciona energía sostenible. Pese a que el compresor de la bomba de calor consume gas natural, el gas natural es el combustible fósil más sostenible. Además, por el propio sistema de funcionamiento de una bomba de calor parte de la energía suministrada proviene del aire considerándose “verde”. En el futuro, el gas natural podría reemplazarse por gases renovables.