



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

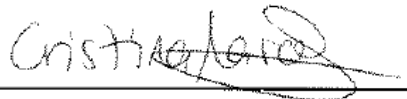
**ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA DE
LA AEROTERMIA Y DEL
ALMACENAMIENTO ELÉCTRICO PARA LA
CLIMATIZACIÓN DE UNA VIVIENDA**

Autor: Cristina de Marcos López-Baissón
Director: Beatriz Yolanda Moratilla Soria

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA DE LA AEROTERMIA Y DEL
ALMACENAMIENTO ELÉCTRICO PARA LA CLIMATIZACIÓN DE UNA
VIVIENDA

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2016-2017 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.

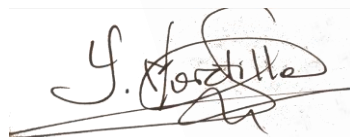
Fdo.: Cristina de Marcos López-Baissón Fecha: 15/06/2017



Cristina de Marcos López-Baissón

Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo: Beatriz Yolanda Moratilla Soria Fecha: 15/06/2017



Y. Moratilla Soria



AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Cristina de Marcos López-Baissón

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA DE LA AEROTERMIA Y DEL ALMACENAMIENTO ELÉCTRICO PARA LA CLIMATIZACIÓN DE UNA VIVIENDA, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.



5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.


La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 15. De junio de 2017

ACEPTA

Fdo





ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA DE LA AEROTERMIA Y DEL ALMACENAMIENTO ELÉCTRICO PARA LA CLIMATIZACIÓN DE UNA VIVIENDA

Autor: Cristina de Marcos López-Balssón
Director: Beatriz Yolanda Moratilla Soria



ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA DE LA AEROTERMIA Y DEL ALMACENAMIENTO ELÉCTRICO PARA LA CLIMATIZACIÓN DE UNA VIVIENDA

Autor: Marcos López-Baissón, Cristina de

Director: Moratilla Soria, Beatriz Yolanda

Entidad colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Introducción

Este proyecto tiene como primer objetivo analizar la viabilidad económica de la utilización de un sistema de aerotermia mediante bomba de calor aire-agua para satisfacer las demanda térmica de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria (ACS) de una vivienda unifamiliar de 130 m² situada en la zona climática continental de la península, concretamente en Madrid, zona D3.

Como alternativas para cubrir esas necesidades se han analizado dos opciones: una caldera de gas natural y una caldera de gasóleo, en ambos casos incorporando un sistema de aire acondicionado para refrigeración. Según la información disponible, hasta el 80% del consumo energético de una vivienda de las características indicadas se dedica a usos térmicos y se satisfacen mayoritariamente haciendo uso de combustibles fósiles, gas natural y gasóleo.

La energía captada desde el medio exterior por las bombas de calor se considera renovable, y, por tanto, computa como tal a los efectos de cumplimiento de los objetivos de Energía y Clima de la UE,. Al mismo tiempo, el uso de electricidad en los sistemas aerotérmicos, sustituyendo a combustibles fósiles de



uso directo, contribuye a la descarbonización de la economía. En España, el 20% de la producción eléctrica es de origen nuclear y casi el 40% de origen renovable, con lo cual, del orden del 60% de la electricidad que consumiría el sistema aerotérmico sería “libre de emisiones de Gases de Efecto Invernadero”, y autóctona. Muchos estados miembros, incluso del norte de Europa han contemplado los sistemas de climatización basados en bomba de calor como uno de elementos básicos para la consecución de los objetivos de clima y energía a 2030.

Metodología

En el proyecto, a partir del modelo de carga térmica, se analiza la curva de necesidades térmicas horarias de energía de la vivienda, con el fin de determinar el consumo anual en función de las fuentes energéticas de los distintos equipos y su coste de energía fijo y variable. En el caso del consumo eléctrico para aerotermia se desciende a nivel horario durante un periodo representativo de tres años teniendo en cuenta el COP y el EER de la bomba de calor que son función de la temperatura exterior, en cada una de las horas.

Así, se obtiene un primer resultado parcial del estudio que pone de manifiesto una de las ventajas de la climatización con bomba de calor: la posibilidad de disponer de una energía equivalente a 17.849 kWh con un consumo de energía eléctrica de 5.659 kWh. De esta forma, se logra una energía del medio (renovable) de 12.190 kWh, es decir con un rendimiento medio anual incluyendo modo caliente y frío del 315%.

A continuación se pasa a valorar el coste de esa energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del sistema aerotérmico. Como se dispone de la demanda de energía horaria que requiere el sistema, se ha utilizado los datos del término de energía del PVPC de las tarifas 2.0, 2.0 DHA de discriminación de dos períodos y 2.0 DHS de discriminación de tres períodos. Para obtener un resultado con mayor



robustez, se ha modelizado los costes horarios de la electricidad durante un período de tres años (abril 2014-marzo 2017) llegándose a la conclusión de que el menor coste del suministro eléctrico se obtendría con la tarifa 2.0 DHA. Incorporando a ese precio de la energía el coste del término fijo (potencia contratada), el impuesto de la electricidad y el IVA, se obtiene el coste total anual de climatización con el sistema aerotérmico.

De forma análoga, sin necesidad de análisis horario, se ha obtenido el coste anual de la energía asociado a las calderas de gas natural y de gasóleo, a partir de las necesidades de calor útil de la vivienda. En estos dos casos, la energía para refrigeración se ha supuesto que se suministra por un sistema de aire acondicionado de las mismas características técnicas que el del sistema aerotérmico, para que la variable refrigeración no afecte de forma distinta y sea comparable. Los costes se muestran en la *Figura i*.

Con todo ello, junto con una estimación de los costes de inversión, instalación, puesta en marcha y mantenimiento de los distintos equipamientos se hace un análisis económico utilizando las metodologías del Valor Actual Neto y del LCOE.

COSTES	Sistema de aeroterma	Caldera de gas + Aire Acondicionado	Caldera de Gasóleo + Aire Acondicionado
COSTES DE INVERSIÓN (€)			
Coste de los equipos			
Calefacción y ACS	7.600	1.400	1.900
Aire acondicionado		3.250	3.250
Coste de Instalación y puesta en marcha	1.500	1.000	1.000
TOTAL Costes de Inversión	9.100	5.650	6.150
COSTES ANUALES DE OPERACIÓN (€/año)			
Coste combustibles fósiles	-	1.159	1.320
Coste electricidad	831	217	217
TOTAL Costes energía	831	1.376	1.537
COSTES ANUALES DE MANTENIMIENTO (€/año)			
TOTAL Coste anual de mantenimiento	100	150	150

Figura i: Costes fijos y variables de los distintos sistemas de climatización.

Fuente: Elaboración Propia

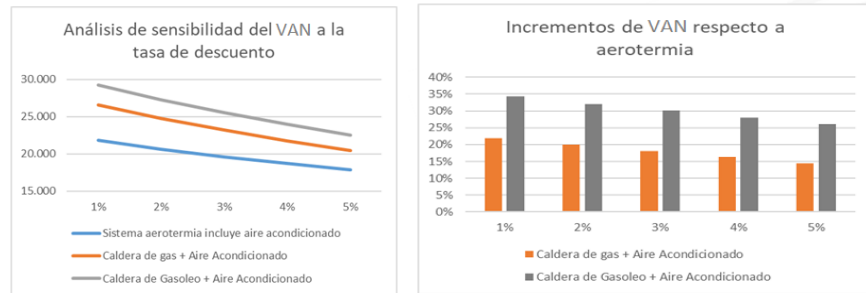


Figura ii: Análisis de viabilidad económica VAN y sensibilidad a la tasa de descuento. Fuente: Elaboración Propia

Tasa de descuento	Sistema aeroterminia	Caldera de gas + Aire Acondicionado	Caldera de Gasóleo + Aire Acondicionado
1%	0,089	0,108	0,119
2%	0,092	0,110	0,121
3%	0,095	0,112	0,123
4%	0,098	0,114	0,126
5%	0,101	0,116	0,128

Figura iii: LCOE en €/kWh en función de la tasa de descuento. Fuente: Elaboración Propia

En segundo lugar, en el caso del sistema de aeroterminia se analiza la viabilidad de complementarlo con una batería de almacenamiento eléctrico en baja tensión, que permita aprovechar al máximo las ventajas de la discriminación horaria de la tarifa eléctrica 2.0 DHA, tanto para los consumos del sistema aerotérmico como para los consumos eléctricos convencionales de la vivienda. Se estudian las modificaciones de la curva cronológica de consumo total de la vivienda haciendo uso de la carga y descarga de la batería en las horas de menor y mayor precio horario respectivamente, y se valorará si los ahorros que cabe esperar en el coste de la electricidad justifican la elevada inversión que requiere este elemento. Para ello también se ha modelado el consumo horario de los usos convencionales de la electricidad en la vivienda de referencia en base a días tipo laborables y festivos de invierno y verano. Como resultado, se obtiene un ahorro



cercano a los 323 €/año IVA e impuestos incluidos, frente a un coste de la batería de 7.750€.

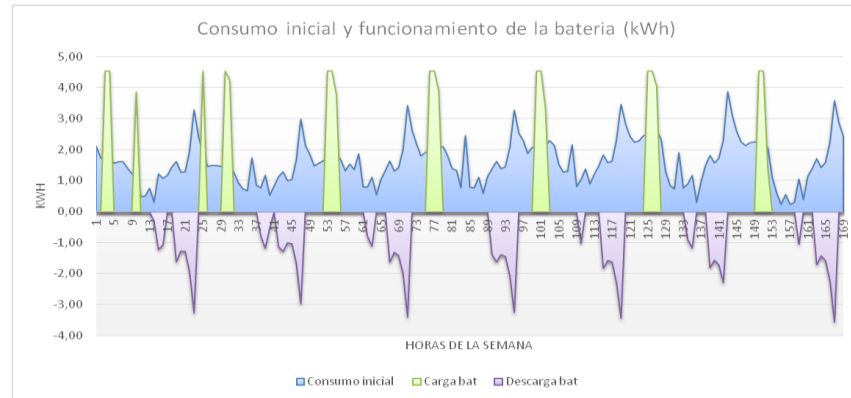


Figura iv: Ciclos de carga y descarga de la batería a lo largo de una semana.

Fuente: Elaboración propia

Resultados

Los principales resultados obtenidos de este proyecto son los siguientes:

- El sistema aerotérmico es plenamente competitivo frente a los otros dos equipamientos y ofrece costes unitarios de la energía final útil entre un 15% y más de un 30% inferiores a lo largo de la vida útil (15 años), en función de la tasa de descuento que se utilice (1%-5%). Ello equivale a ahorros entre 2.500 € y 7.500 € a lo largo de la vida útil. El principal inconveniente para el aumento de la penetración de los sistemas aerotérmicos es que requieren una inversión inicial elevada respecto al resto de alternativas
- En segundo lugar, para la vivienda dotada de sistema de aerotermia, se ha analizado la viabilidad de complementar el equipamiento con una batería que permita aprovechar al máximo las ventajas de la discriminación horaria de la tarifa 2.0 DHA, tanto para los consumos del sistema aerotérmico como los consumos eléctricos convencionales de la vivienda. Para ello se ha optimizado la curva cronológica de consumo de la vivienda cargando la batería en las horas de menor precio horario y usando la energía acumulada en las horas de mayor precio del periodo punta.



Como resultado se obtiene que, si bien con la batería se podría lograr un ahorro en el entorno del 20% en el coste del término de energía, la inversión necesaria con los costes actuales del almacenamiento hace poco razonable desde el punto de vista económico esta opción. Para que se pudiese contemplar su viabilidad, sería necesaria una reducción de los costes del almacenamiento de aproximadamente un 70% respecto al precio actual. Según diversas fuentes, ese nivel de costes tardará unos diez años en lograrse.



**ECONOMIC VIABILITY OF AEROTHERMAL
TECHNOLOGY AND ELECTRICAL STORAGE FOR
RESIDENTIAL HEATING, COOLING AND HOT WATER
PRODUCTION**

Author: Marcos López-Baissón, Cristina de

Director: Moratilla Soria, Beatriz Yolanda

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

PROJECT SUMMARY

Introduction

The first objective of the following Project is to carry out an economic viability analysis of using aerothermal technology, installing an air-water heat pump to cover the thermal demand of heating, cooling and hot water preparation of a single-family house of 130 m² located in the Spanish Continental climatic zone, more precisely in Madrid (D3).

As alternatives to satisfy those needs, two options have been analyzed: a natural gas heater and a diesel oil heater, both complimented by an air conditioning system for cooling. According to the available information, up to 80% of the energy consumption of a household with the previous characteristics is used for covering thermal services mainly using fossil fuels, such as natural gas and diesel.



Energy captured from the environment (air) by the heat pump is considered renewable, and therefore computes as such for meeting the EU Energy and Climate targets. At the same time, the use of electricity in aerothermal systems, substituting fossil fuels for direct use, contributes to the decarbonization of the economy. In Spain, 20% of electricity production is of nuclear origin and almost 40% of renewable origin, which means that 60% of the electricity consumed by the aerothermal system would be "free of emissions of greenhouse gases", and autochthonous. Many Member States, even in northern Europe, have contemplated heat pumps as one of the basic drivers for achieving the 2030 Climate and Energy framework defined by the EU.

Methodology

Using the thermal load model, the thermal hourly energy demand curve of the dwelling is analyzed in order to determine the annual consumption of the energy sources of the different equipments and both its fixed and variable energy cost. In the case of the aerothermal technology electrical consumption, the hourly level during a representative period of three years is studied, taking into account that the COP and the EER of the heat pump are a function of the external temperature, which is different for each one of the hours.

Thus, a first partial result of the study is obtained which shows one of the advantages of acclimatization with heat pumps: the possibility of having an equivalent energy of 17,849 kWh with an electric energy consumption of 5,659 kWh. Therefore, an energy of the environment (renewable) of 12,190 kWh is achieved, that is an overall seasonal performance factor of 315%.

Then, the cost of the electric energy necessary for the operation of the aerothermal system is evaluated. As the hourly energy demand required by the system is available, data from the PVPC energy term of rates 2.0, 2.0 DHA of two-period discrimination and 2.0 DHS of three-period discrimination have been



used. To obtain a more robust result, the hourly costs of electricity have been modeled over a three-year period (April 2014-March 2017), concluding that the lowest cost of electricity supply would be obtained with the 2.0 DHA rate. Adding to the energy term, the cost of the fixed term (contracted power), the electricity tax and VAT, the total annual cost of heating, cooling and hot water preparation with the aérothermal system is obtained.

Similarly, without the need for hourly analysis, the annual cost of energy for natural gas and diesel oil boilers has been obtained. In these two cases, the energy for cooling has been assumed to be supplied by an air conditioning system with the same technical characteristics as that of the aérothermal system, so that it is comparable. Costs are shown in *Figure i*.

Together with an estimation of the investment, installation and start-up and maintenance costs of the various equipments, an economic analysis is carried out using the Net Present Value and LCOE methodologies

COSTES	Sistema de aérotermia	Caldera de gas + Aire Acondicionado	Caldera de Gasóleo + Aire Acondicionado
COSTES DE INVERSIÓN (€)			
Coste de los equipos			
Calefacción y ACS	7.600	1.400	1.900
Aire acondicionado		3.250	3.250
Coste de Instalación y puesta en marcha	1.500	1.000	1.000
TOTAL Costes de Inversión	9.100	5.650	6.150
COSTES ANUALES DE OPERACIÓN (€/año)			
Coste combustibles fósiles	-	1.159	1.320
Coste electricidad	831	217	217
TOTAL Costes energía	831	1.376	1.537
COSTES ANUALES DE MANTENIMIENTO (€/año)			
TOTAL Coste anual de mantenimiento	100	150	150

Figure i: Fixed and variable costs of different systems. Source: Own elaboration

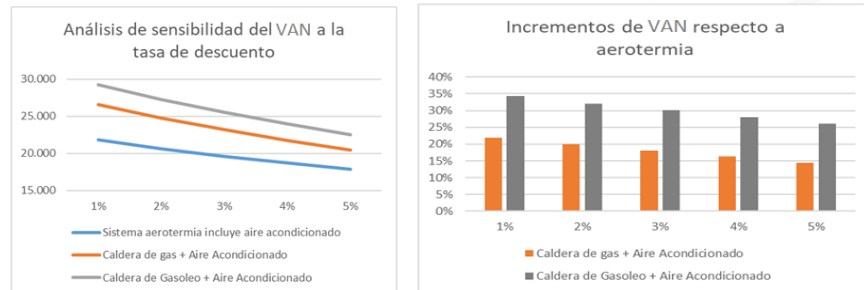


Figure ii: NPV and discount rate sensibility analysis. Source: Own elaboration

Tasa de descuento	Sistema aeroterminia	Caldera de gas + Aire Acondicionado	Caldera de Gasóleo + Aire Acondicionado
1%	0,089	0,108	0,119
2%	0,092	0,110	0,121
3%	0,095	0,112	0,123
4%	0,098	0,114	0,126
5%	0,101	0,116	0,128

Figure iii: LCOE in €/kWh as a function of the discount rate. Source: Own elaboration

Secondly, in the case of the arothermal system, the feasibility of complementing it with a low voltage electrical storage battery is analyzed, taking advantage of the hourly discrimination of the 2.0 DHA electric tariff, both for the consumption profile of the arothermal system and for the conventional electrical consumptions of the house. The changes in the curve of the total electrical consumption of the house are modified by charging and discharging the battery in the hours of lower and higher hourly price respectively, and it will be assessed if the savings that can be expected in the cost of electricity justify the high investment that is required. For this purpose, the conventional consumption of electricity in the house of reference has also been modeled based on working days or holidays and winter and summer. As a result, savings of around € 323 / year VAT and taxes included are achieved, compared to a battery cost of € 7,750

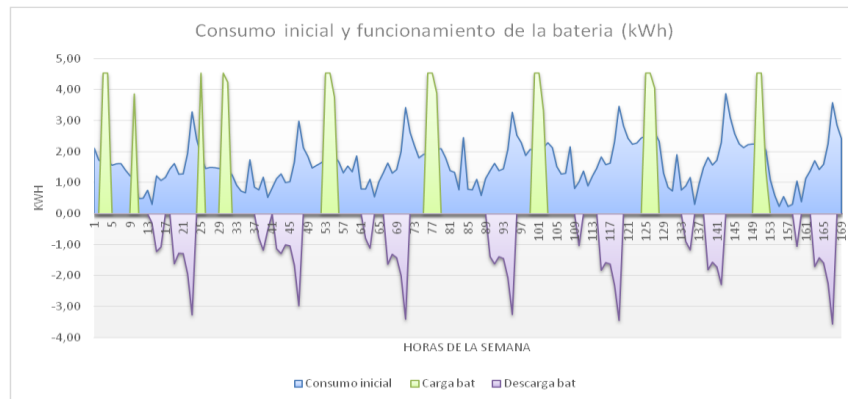


Figura iv: Battery charge and discharge weekly cycles. Source: Own elaboration

Results

The main results obtained are the following:

- The aerothermal system is fully competitive compared to the other two alternatives and results in unit costs of the final energy between 15% and more than 30% lower over the expected life of the equipments (15 years), depending on the discount rate(1% -5%). This is equivalent to savings between € 2,500 and € 7,500 over the lifetime of the equipments. The main disadvantage is that aerothermal systems require a high initial investment with respect to the other alternatives.
- Secondly, for the housing equipped with the aerothermal system, the feasibility of complementing it with a battery that allows to take full advantage of the time discrimination of the 2.0 DHA tariff has been analyzed, both for the consumption of the aerothermal system and the conventional electrical consumption profile. For this, the chronological curve of consumption has been optimized by charging the battery in the hours of the lowest hourly rate and using the energy accumulated in the hours of higher price of the peak period.

As a result it can be concluded that, although with the battery, savings around 20% in the cost of the energy term could be achieved, the necessary initial investment with the current costs of the storage systems does not make this option reasonable from the economic point of view. In order to be feasible, a reduction in storage costs of approximately 70% over the current price would be necessary. According to various sources, this level of costs will be achieved within ten years.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Introducción



Índice de la memoria

Parte I	Memoria.....	28
Capítulo 1	Introducción	32
Capítulo 2	Vivienda de referencia.....	42
2.1	Definición de la vivienda.....	42
2.2	Zona Climática y Demanda de Referencia.....	43
2.2.1	metodología: Modelo de carga térmica	46
Calefacción y refrigeración		47
Caso de referencia para edificios antiguos		55
Caso de referencia para edificios de nueva construcción		57
Agua Caliente Sanitaria (ACS)		59
2.2.2	Resumen de Resultados.....	63
2.3	Caracterización de los consumos eléctricos convencionales de la vivienda	
64		
2.3.1	Precio voluntario al pequeño consumidor: PVPC	64
2.3.2	Perfil de consumo.....	69
Capítulo 3	Análisis y Costes de los Posibles Sistemas de Climatización	76
3.1	Descripción de las distintas alternativas y consumos de Energía.....	76
3.1.1	Aeroterminia	76
Funcionamiento de una bomba de calor		76
Tipos de bombas de calor		78
Eficiencia energética		80
Marco Europeo.....		82
Marco Nacional		85
Selección de una bomba de calor		86
Metodología empleada		90
3.1.2	Caldera de gas natural para calefacción y producción de ACS y Aire Acondicionado para refrigeración	96



3.1.3 Caldera de gasóleo para calefacción y producción de ACS y Aire Acondicionado para refrigeración.....	97
3.2 Costes de Operación de las Tres Alternativas.....	98
3.2.1 Coste de la climatización mediante aerotermia	98
3.2.2 Coste del Suministro mediante caldera de gas Natural y aire acondicionado	100
Coste del gas natural para calefacción y ACS	101
Coste de la electricidad del aire acondicionado para refrigeración	102
3.2.3 Coste del Suministro mediante caldera de gasóleo y aire acondicionado	106
Coste del gasóleo para calefacción y ACS	106
Coste de la electricidad del aire acondicionado para refrigeración	106
3.3 Análisis económico y comparativa de las alternativas propuestas.....	107
3.3.1 Valor Actual Neto	109
3.3.2 LCOE	112
Capítulo 4 Análisis de viabilidad de incorporar una batería para almacenamiento de energía eléctrica	114
4.1 Modelado del ciclo diario de almacenamiento y descarga.....	116
4.2 Análisis de viabilidad económica del almacenamiento de electricidad con batería en una vivienda.....	119
Análisis de sensibilidad a la capacidad de almacenamiento de la batería	121
Mecanismo de gestión de la demanda para el sistema eléctrico.....	123
Capítulo 5 Conclusiones y consideraciones.....	126
Capítulo 6 Bibliografía.....	128



Índice de figuras

Figura 1: Posible trayectoria de reducción del 80% de las emisiones de gases de efecto invernadero de la UE respecto de 1990. Fuente: Comisión Europea	33
Figura 2: Energía primaria para la calefacción y refrigeración, 2012. Fuente: Comisión Europea	34
Figura 3: Estructura del consumo total residencial en España según fuentes energéticas. Fuente: Análisis del sector residencial español. Proyecto SECH-SPAHOUSE. IDAE.....	36
Figura 4: Estructura del Consumo por servicios. Fuente: Análisis del sector residencial español. Proyecto SECH-SPAHOUSE. IDAE	37
Figura 5: Zonas climáticas de España. Fuente: IDAE.....	38
Figura 6: Desagregación según Consumo Térmico y Eléctrico de los hogares en la Zona continental. Fuente: IDAE PROYECTO SECH-SPAHOUSEC Tendencias del Consumo Energético (ktep) del sector residencial en España.	39
Figura 7: Consumo Energético Unitario de la Zona Continental por tipos de Vivienda. Fuente: IDAE PROYECTO SECH-SPAHOUSEC.....	40
Figura 8: Zonas climáticas de España. Fuente: CTE Plus.....	43
Figura 9: Temperaturas horarias. Fuente: AEMET.....	45
Figura 10: Radiación solar horaria W/m^2 Fuente: AEMET	45
Figura 11: Demandas de referencia anuales según calificación energética en Madrid. Fuente: IDAE.....	54
Figura 12: Demanda térmica horaria w/m^2 para tres meses de invierno y cuatro de verano, edificios antiguos. Fuente: Elaboración Propia	55
Figura 13: Demanda térmica horaria W/m^2 ampliada a cinco meses, edificios antiguos. Fuente: Elaboración propia.....	55



Figura 14: Curva monótona de demanda térmica horaria de calefacción, edificios antiguos. Fuente: Elaboración Propia.....	56
Figura 15: Curva monótona de demanda térmica horaria de refrigeración, edificios antiguos. Fuente: Elaboración Propia.....	56
Figura 16: Demanda térmica horaria w/m^2 para tres meses de invierno y cuatro de verano, edificios nuevos. Fuente: Elaboración Propia	57
Figura 17: Demanda térmica horaria W/m^2 ampliada, edificios nuevos. Fuente: Elaboración Propia	57
Figura 18: Curva monótona de demanda térmica horaria de calefacción, edificios nuevos. Fuente: Elaboración Propia.....	58
Figura 19: Curva monótona de demanda térmica horaria de refrigeración, edificios nuevos. Fuente: Elaboración Propia.....	58
Figura 20: Demanda térmica de ACS. Fuente: Elaboración Propia.....	60
Figura 21: Demanda térmica horaria de refrigeración por día (fila) y hora (columna) para los meses de junio, julio, agosto y septiembre. Fuente: Elaboración Propia	62
Figura 22: Producción concentrada de ACS durante la noche. Fuente: Elaboración Propia.....	63
Figura 23: Términos de facturación de energía activa del PVPC. Fuente: ESIOS	67
Figura 24: Detalle componentes del precio de la tarifa de energía. Fuente: ESIOS	68
Figura 25: Curva monótona de precios de término de energía para distintas tarifas. Fuente: Elaboración Propia.	69
Figura 26: Porcentaje de clientes domésticos con contador inteligente telegestionado por Comunidad autónoma. Fuente: SIMEL (1/05/2017)	70
Figura 27: Caracterización de los consumos convencionales de la vivienda en base a días tipo: invierno laborable y festivo y verano laborable y festivo. Fuente: Elaboración Propia.	72
Figura 28: Consumo eléctrico horario. Fuente: Elaboración propia	72



Figura 29: Curva monótona de consumo eléctrico horario. Fuente: Elaboración propia.....	72
Figura 30: Potencia instantánea horaria. Fuente: Elaboración propia.....	73
Figura 31: Curva monótona de potencia instantánea. Fuente: Elaboración propia.....	73
Figura 32: Esquema de funcionamiento de una bomba de calor accionada mecánicamente. Fuente: Parque de bombas de calor en España. IDAE	77
Figura 33: Calificación energética de bombas de calor. Fuente: Snowmenkima .	82
Figura 34: Calificación energética basada en parámetros estacionales de una bomba de calor. Fuente: Atecal	82
Figura 35: Parque de bombas aerotérmicas y geotérmicas instaladas en Europa en 2015, en unidades. Fuente: Eurobserv'ER	84
Figura 36: Parque de bombas de calor en España según rangos de potencia y zona climática. Fuente: IDAE.....	86
Figura 37: Parque de bombas de calor por sectores según rangos de potencia. Fuente: IDAE	86
Figura 38: Esquemas de principio bomba AQUA 3. Fuente: Ferroli.....	88
Figura 39: Prestaciones bomba de calor AQUA3 en modo calor. Fuente: Ferroli	89
Figura 40: Prestaciones bomba de calor AQUA3 en modo frío. Fuente: Ferroli..	89
Figura 41: Prestaciones bomba de calor empleada en modo calor $COP_i(\text{Text}^\circ\text{C})$ y $P_{\text{termica}_i(\text{Text}^\circ\text{C})}$. Fuente: Elaboración Propia a partir de las prestaciones indicadas por Ferroli.....	93
Figura 42: Potencia suministrada por la red a plena carga $P_{\text{sum}_i(\text{Text}^\circ\text{C})}$. Fuente: Elaboración propia.	93
Figura 43: Consumo de la red en modo calefacción y ACS a lo largo del año, $E_{\text{red}_i(\text{Text}^\circ\text{C})}$	94
Figura 44: Prestaciones bomba de calor empleada en modo frío $EER_i(\text{Text}^\circ\text{C})$ y $P_{\text{termica}_i(\text{Text}^\circ\text{C})}$. Fuente: Elaboración Propia a partir de las prestaciones indicadas por Ferroli.....	94



Figura 45: Potencia térmica en modo frío consumida de la red a plena carga, $P_{sum_i}(\text{Text}^\circ\text{C})$. Fuente: Elaboración propia	95
Figura 46: Consumo de la red en modo refrigeración a lo largo del año, $E_{red_i}(\text{Text}^\circ\text{C})$	95
Figura 47: Consumo horario para refrigeración kWh. Fuente: Elaboración propia	103
Figura 48: Consumo horario para refrigeración en €. Fuente: Elaboración propia	103
Figura 49: Análisis de sensibilidad del VAN a la tasa de descuento. Fuente: Elaboración Propia	111
Figura 50: Incrementos de VAN respecto a aerotermia en función de la tasa de descuento. Fuente: Elaboración Propia	111
Figura 51: Discriminación horaria invierno y verano, horarios de precios reducidos y con recargo. Fuente: Esios	115
Figura 52: Características técnicas Powerwall Tesla. Fuente: Tesla.....	116
Figura 53: Evolución y variación de precio de las baterías de ión-litio. Fuente: Bloomberg New Energy Finance.	121
Figura 54: Estimación de la evolución del precio de las baterías de ión-litio (\$/kWh). Fuente: Bloomberg New Energy Finance.....	121
Figura 55: Análisis de sensibilidad a la capacidad de almacenamiento de la batería. Fuente: Elaboración Propia	122
Figura 56: Ahorro medio anual en función de la capacidad de almacenamiento de la batería. Fuente: Elaboración Propia	122
Figura 57: Mecanismos de gestión de la demanda. Fuente: Máster Ejecutivo REE	123



Índice de tablas

Tabla 1: Estructura del consumo total residencial en España. Fuente: Análisis del sector residencial español. Proyecto SECH-SPAHOUSE. IDAE.....	35
Tabla 2: Estructura del Consumo por servicios en los hogares (ktep y %). Fuente: Análisis del sector residencial español. Proyecto SECH-SPAHOUSE. IDAE.....	36
Tabla 3: Fuentes energéticas de consumo de calefacción y ACS, año 2014. Fuente: MINETUR/IDAE/INE	37
Tabla 4: Consumos por fuente energética y zona climática. Fuente: IDEA	38
Tabla 5: Valores medios mensuales de temperatura e irradiación solar. Fuente: AEMET	44
Tabla 6: Temperatura agua de la red mensual zona D3. Fuente: IDAE.....	46
Tabla 7: Coeficientes para el cálculo de la Severidad Climática	48
Tabla 8: Valores R y GD para Madrid	49
Tabla 9: Valores de SC para Madrid	49
Tabla 10: Intervalos para la zonificación de invierno	49
Tabla 11: Intervalos para la zonificación de verano.....	49
Tabla 12: Demandas de Referencia a partir de SC para edificios existentes	50
Tabla 13: Demandas de Referencia a partir de SC para edificios nuevos.....	50
Tabla 14: Valores de ρ y δ de referencia.....	51
Tabla 15: Valores totales anuales de demanda térmica de refrigeración y calefacción. Fuente: Elaboración propia	53
Tabla 16: Factores de corrección en función de la calificación energética del edificio. Fuente: IDAE	53
Tabla 17: Propiedades del agua.....	59



Tabla 18 :Energía útil necesaria para los servicios de la vivienda (kWh)	63
Tabla 19: Consumo por tipo de electrodoméstico.....	71
Tabla 20: Coste anual del término de energía por integración de los consumos horarios modelados y el precio horario publicado por Esios. Fuente: Elaboración Propia.....	74
Tabla 21: Prestaciones nominales según condiciones de trabajo. Fuente: Ferroli.	88
Tabla 22: Límites operativos bomba de calor. Fuente: Ferroli	90
Tabla 23: Resumen consumos aerotermia. Fuente: Elaboración propia.	96
Tabla 24: Término de energía anual del consumo del sistema de aerotermia (antes de IE e IVA) para las distintas tarifas de PVPC. Fuente: Elaboración Propia	99
Tabla 25: Precios sin impuestos de la tarifa de último recurso de gas natural en vigor desde las cero horas de día 1 de abril de 2017.Fuente: BOE.....	101
Tabla 26: Término de energía del consumo para refrigeración (antes de IE e IVA) para la tarifa de PVPC. 2.0	104
Tabla 27: Costes de inversión en equipos, instalación y puesta en marcha. Fuente: Elaboración Propia	108
Tabla 28: Costes anuales de operación. Fuente: Elaboración Propia.....	108
Tabla 29: Valor Actual Neto con Tasa de descuento del 3% para las distintas alternativas de climatización	110
Tabla 30: LCOE Leveraged Cost of Final Energy (€/kWh útil) de las tecnologías estudiadas. Fuente: Elaboración Propia.....	113
Tabla 31: Previsiones para 2017 sobre el número de clientes, la potencia facturada y el consumo de la propuesta de Orden según la Memoria que acompaña a la propuesta de Orden de Peajes, y de la CNMC	114
Tabla 32: Resultados de la incorporación de una batería en el sistema de aerotermia. Fuente: Elaboración Propia.	118
Tabla 33: Evolución temporal del ahorro anual debido al almacenamiento mediante baterías (€/año). Fuente: Elaboración propia.....	119



Tabla 34: Costes batería Powerwall TESLA. Fuente: TESLA 119



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Introducción



Parte I MEMORIA



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Introducción



Este proyecto tiene como primer objetivo analizar la viabilidad económica de la utilización de un sistema de aerotermia mediante bomba de calor para satisfacer las necesidades energéticas de calefacción, refrigeración y ACS de una vivienda unifamiliar situada en la zona climática continental de la península.

Como alternativas para cubrir esas necesidades se han analizado dos opciones: con caldera de gas natural y con caldera de gasóleo, en ambos casos incorporando un sistema de aire acondicionado para refrigeración.

A partir del modelo de carga térmica, se analiza la curva de necesidades horarias de energía de la vivienda, con el fin de determinar el consumo anual de las fuentes energéticas de los distintos equipamientos y su coste de energía fijo y variable. En el caso del consumo eléctrico para aerotermia se descende a nivel horario durante un periodo representativo de tres años teniendo en cuenta el COP y el EER de la bomba de calor en función de la temperatura exterior en cada una de las horas. Con todo ello, junto con una estimación de los costes de inversión, instalación y puesta en marcha y mantenimiento de los distintos equipamientos se verá la viabilidad económica de esta tecnología en el entorno de precios reciente de las distintas energías finales en España.

En segundo lugar, en el caso del sistema de aerotermia se analizará la viabilidad de complementarlo con una batería de almacenamiento eléctrico en baja tensión, que permita aprovechar al máximo las ventajas de la discriminación horaria de la tarifa eléctrica 2.0 DHA, tanto para los consumos del sistema aerotérmico como para los consumos eléctricos convencionales de la vivienda. Se estudiarán las modificaciones de la curva cronológica de consumo total de la vivienda haciendo uso de la carga y descarga de la batería en las horas de menor y mayor precio horario respectivamente, y se valorará si los ahorros que cabe esperar en el coste de la electricidad justifican la elevada inversión que requiere este elemento.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Introducción



Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha avanzado de forma sustancial en la mejora de las prestaciones de la bomba de calor y se han desarrollado sistemas aerotérmicos a nivel comercial que ofrecen notables ventajas en lo que se refiere a eficiencia energética, a la vez que permiten el aprovechamiento de una fuente renovable como es el calor del medioambiente.

Existen unos objetivos de descarbonización de la economía europea a 2050 que pretenden reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero en un 80-95% respecto de las emisiones del año 1990, para lograrlo, las energías limpias y la eficiencia energética desempeñan un papel fundamental. Todo esto está definido en la Hoja de ruta de la energía para 2050 [1].

En esa trayectoria, el paquete de Clima y Energía 2030 [2] plantea unos objetivos de penetración de Energías renovables del 27% del consumo de energía final bruto en la UE, una mejora de la eficiencia energética del 30% respecto un escenario tendencial y una reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero en un 40% respecto de las emisiones del año 1990.

Para los Estados Miembros ello supondrá un esfuerzo importante en todos los ámbitos de actuación, en el que todos los sectores tienen un papel importante, en función de su potencial tecnológico y económico. Dos de estos sectores con elevada importancia en cuanto a las reducciones de emisiones que cabe esperar son precisamente en los que se centra el proyecto presentado a continuación: los Edificios (producción de calefacción, refrigeración y ACS) e indirectamente la parte de Producción de electricidad correspondiente precisamente a cubrir las necesidades térmicas del sector residencial.

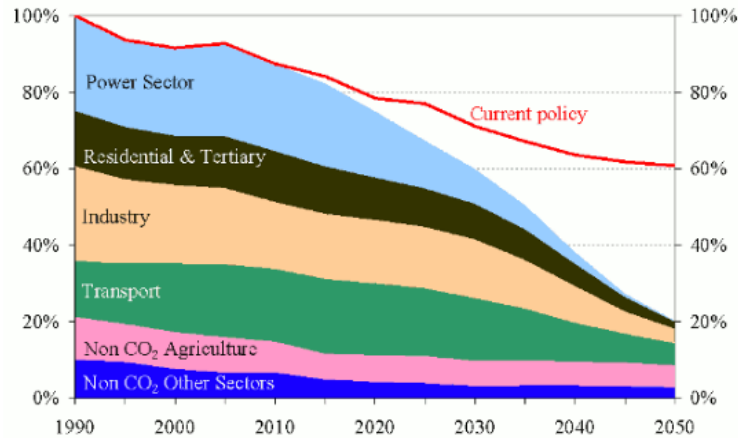


Figura 1: Posible trayectoria de reducción del 80% de las emisiones de gases de efecto invernadero de la UE respecto de 1990. Fuente: Comisión Europea

De acuerdo con la Hoja de Ruta de la Energía para 2050, para lograr disminuir las emisiones de CO₂ “en el transporte y la calefacción, la electricidad podría sustituir parcialmente a los combustibles fósiles.” Por otro lado, si se toman las medidas necesarias, “las emisiones residenciales y de los edificios de oficinas se podrían reducir casi por completo (en torno al 90% en 2050).” Entre estas medidas, se destaca “la sustitución de los combustibles fósiles por la electricidad y las energías renovables para usos de calefacción, climatización y preparación de alimentos”. Se pone de manifiesto, por tanto, el papel que los sistemas basados en la bomba de calor pueden jugar en el logro de esos objetivos.

Prácticamente la mitad de los edificios de la UE tienen calderas individuales instaladas antes de 1992 cuya eficiencia es de un 60% o inferior. El 22 % de las calderas de gas, el 34 % de los aparatos eléctricos directos, el 47 % de las calderas de petróleo y el 58 % de las calderas de carbón han llegado ya al final de su ciclo de vida técnico [3].

Las decisiones sobre la sustitución de los aparatos antiguos, por lo general, se efectúan bajo presión, cuando el sistema comienza a fallar. **“La mayor parte de los consumidores no encuentran fácilmente información disponible relativa al funcionamiento del sistema existente o para comparar los precios de las soluciones. Esto les lleva a continuar utilizando tecnologías conocidas, pero menos eficientes”**.

Con un 50 % (546 Mtep) de consumo de energía final¹ en 2012, la calefacción y la refrigeración son el mayor sector energético de la UE y se espera que esta situación se mantenga [3]. La *Figura 2* muestra la estructura de consumo de energía primaria en la UE en el año 2012 para calefacción y refrigeración, como se puede observar, los combustibles fósiles suponen cerca de un 75%, por ello la Comisión invita a los Estados miembros a centrarse en los incentivos a las tecnologías de calefacción y refrigeración no basadas en combustibles fósiles.

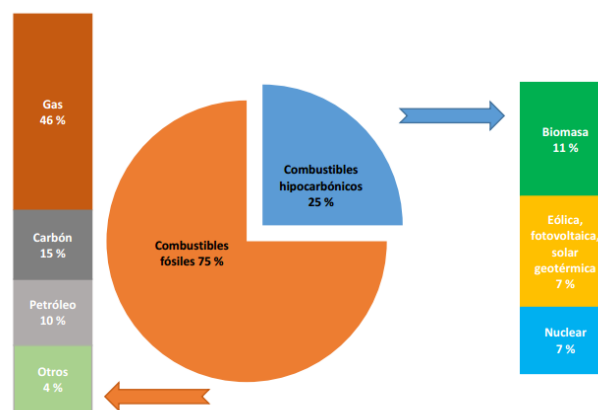


Figura 2: Energía primaria para la calefacción y refrigeración, 2012. Fuente: Comisión Europea

¹ 684 Mtep de energía primaria



En el caso concreto de España, el Proyecto SECH-SPAHOUSE lleva a cabo un Análisis del Consumo Energético del Sector Residencial en España, y, del mismo modo, pone de manifiesto que “*uno de los campos de actuación de mayor relevancia será el del consumo energético de los hogares*”. En el año 2010 el consumo de Energía Final de los Hogares supuso 14.676 ktep². Ello supone un 17% del consumo de energía final y su estructura se puede observar en la *Tabla 1* y la *Figura 3*:

Fuente de energía	ktep	% del Consumo Total
Electricidad	5.159	35,1%
Gas Natural	3.660	24,9%
Derivados de petróleo ³	3.247	22,1
Energías Renovables ⁴	2.595	17,7%
Carbón	15	0,1%
TOTAL	14.476	100,0%

Tabla 1: Estructura del consumo total residencial en España. Fuente: Análisis del sector residencial español. Proyecto SECH-SPAHOUSE. IDAE

² 1 ktep (tonelada equivalente de petróleo) = 11.630 kWh

³ Derivados del petróleo incluyen GLP, gasóleo y otros

⁴ Energías renovables incluye principalmente solar térmica, biomasa y geotérmica

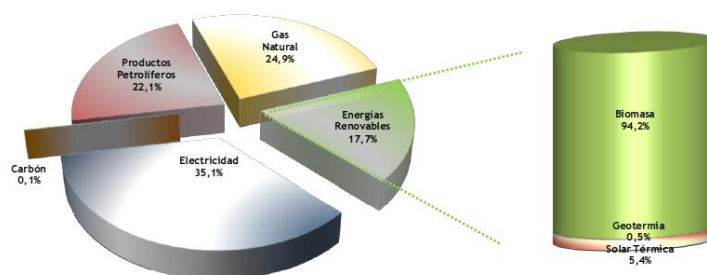


Figura 3: Estructura del consumo total residencial en España según fuentes energéticas. Fuente: Análisis del sector residencial español. Proyecto SECH-SPAHOUSE. IDAE

Puede observarse que existe por tanto una elevada dependencia de los combustibles fósiles, superior al 45%.

En la *Tabla 2* y la *Figura 4* se muestra la estructura del consumo energético por servicios. Como se puede apreciar, los usos térmicos de calefacción y agua caliente sanitaria suponen en conjunto el 66% de las necesidades energéticas de los hogares:

Uso	ktep	% del total
Calefacción	6.892	47,0%
ACS	2.776	18,9%
Cocina	1.090	7,4%
Iluminación	606	4,1%
Aire Acondicionado	123	0,8%
Electrodomésticos	3.188	21,7%
CONSUMO TOTAL DE LOS HOGARES	14.676	100,0%

Tabla 2: Estructura del Consumo por servicios en los hogares (ktep y %). Fuente: Análisis del sector residencial español. Proyecto SECH-SPAHOUSE. IDAE

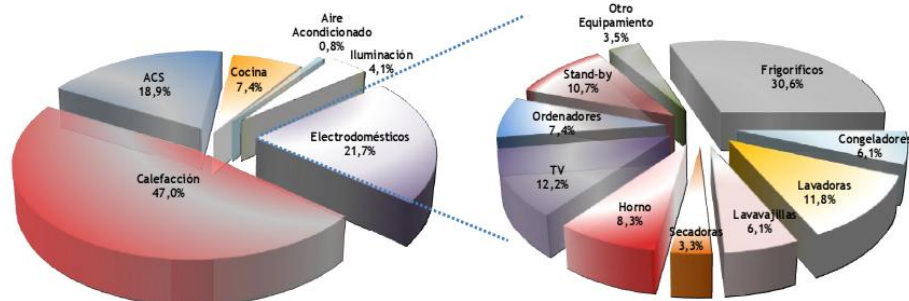


Figura 4: Estructura del Consumo por servicios. Fuente: Análisis del sector residencial español. Proyecto SECH-SPAHOUSE. IDAE

Además, se observa como los productos petrolíferos se usan en los hogares básicamente para calefacción (2.421 ktep) y obtención de ACS (642 ktep). Lo mismo cabe decir del Gas Natural que aporta 1.433 ktep para calefacción y 1.324 ktep para ACS. También se observa en la tabla anterior la baja penetración de la electricidad en estos servicios.

	Carbón	Productos Petrolíferos	Gas Natural	Renovables	Energía Eléctrica	TOTAL	Consumo Total según Usos	
							Térmicos	Eléctricos
Calefacción (ktep)	75	1.876	1.433	2.479	448	6.311	5.863	448
ACS (ktep)	6	607	1.324	243	454	2.634	2.179	454
CONSUMO TOTAL DE LOS HOGARES (ktep)	92	2.674	3.094	2.752	6.081	14.692	8.611	6.081

Tabla 3: Fuentes energéticas de consumo de calefacción y ACS, año 2014.

Fuente: MINETUR/IDAE/INE

En España, existen tres zonas climáticas diferenciadas: Atlántico-Norte, Mediterránea y Continental, como se muestra en la *Figura 5*. Debido a las

diferencias de temperatura, humedad y radiación solar, los consumos energéticos en cada una de ellas son notablemente diferentes.

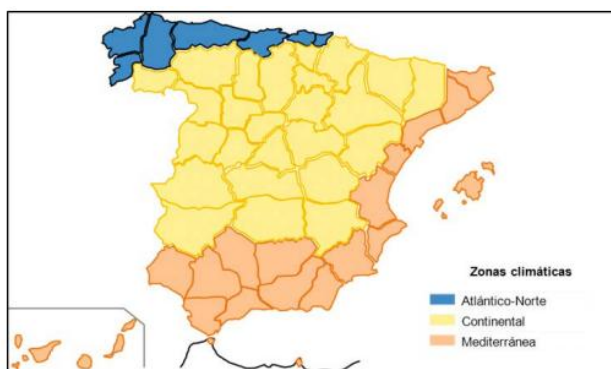


Figura 5: Zonas climáticas de España. Fuente: IDAE

Se muestran en la *Tabla 4* los consumos de calefacción, refrigeración y ACS según fuentes energéticas para cada una de las tres zonas climáticas.

Se observa que los consumos en las zonas Continental y Mediterráneo son muy superiores. Además, en la zona Continental, el consumo de combustibles frente al consumo eléctrico es 11 veces superior, mientras que en la zona Mediterránea es 7 veces superior.

Usos finales (MWh)	Atlántico-Norte		Continental		Mediterráneo	
	Combustibles	Eléctrico	Combustibles	Eléctrico	Combustibles	Eléctrico
Calefacción	7.706.944	690.976	38.683.611	1.697.708	29.350.000	2.029.250
ACS	3.971.667	621.515	11.789.444	2.341.106	12.048.333	2.963.806
Refrigeración	5.000	13.867	6.944	534.894	17.778	851.423

Tabla 4: Consumos por fuente energética y zona climática. Fuente: IDAE

Por tanto, para el caso de estudio, se va a seleccionar una vivienda precisamente en la zona Continental ya que es la que presenta un mayor consumo de combustibles fósiles para calefacción con menor presencia eléctrica en términos relativos y, por tanto, como se pondrá de manifiesto se puede mejorar notablemente la eficiencia en estos usos.

Así, en la *Figura 6* se observa la estructura del consumo en los hogares de la Zona Continental. Según el PROYECTO SECH-SPAHOUSEC de IDAE “*el consumo medio de los hogares ubicados en la zona Continental es de 13.141 kWh al año 0,047 TJ, un 27% superior a la media nacional, como consecuencia de la climatología asociada a la zona y caracterizada por el gran contraste térmico entre veranos e inviernos. Los consumos de calefacción, basados preferentemente en sistemas térmicos, representan el 55% del consumo del sector.*”

Desagregación según Consumo Térmico y Eléctrico:

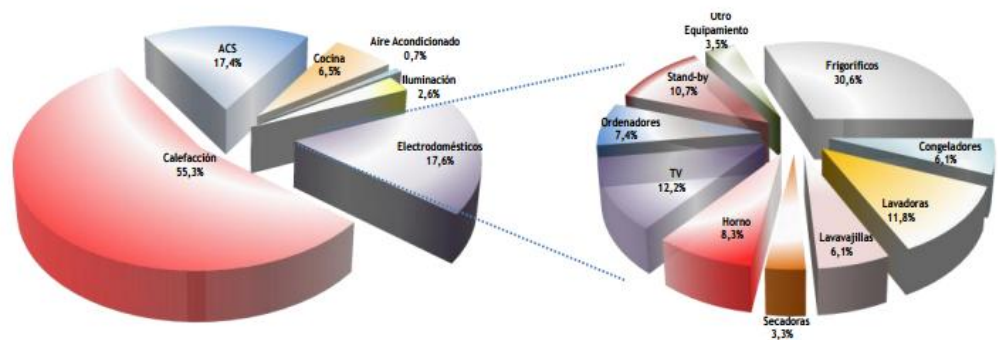


Figura 6: Desagregación según Consumo Térmico y Eléctrico de los hogares en la Zona continental. Fuente: IDAE PROYECTO SECH-SPAHOUSEC Tendencias del Consumo Energético (ktep) del sector residencial en España.

Y dentro de la zona continental son las viviendas unifamiliares las que lógicamente presentan un mayor consumo de calefacción, ACS y refrigeración, como pone de manifiesto la *Figura 7*.

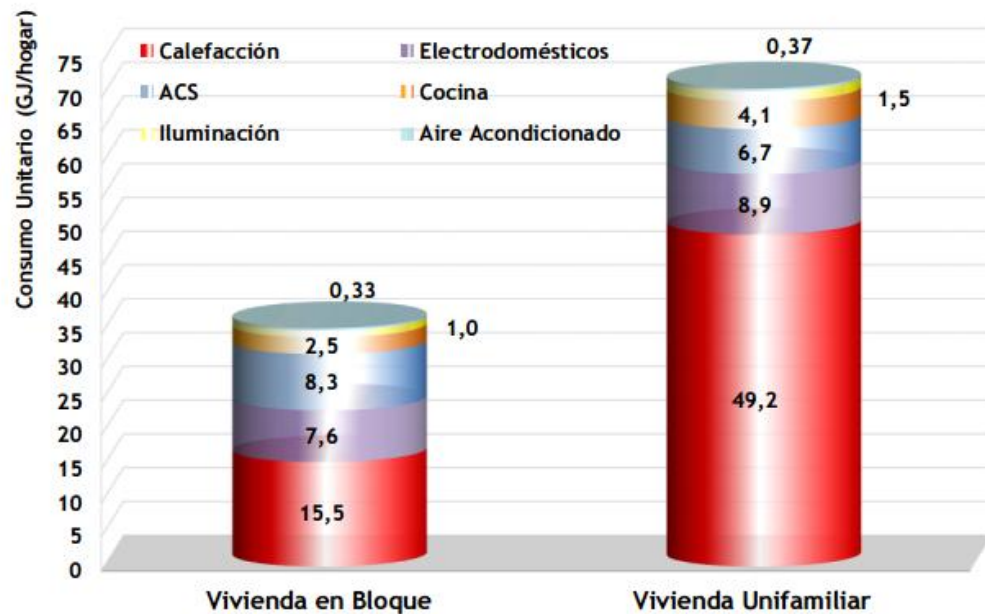


Figura 7: Consumo Energético Unitario de la Zona Continental por tipos de Vivienda. Fuente: IDAE PROYECTO SECH-SPAHOUSEC

Es por ello por lo que se ha seleccionado una vivienda unifamiliar en zona continental para la realización de este estudio: el 80% de su consumo energético se dedica a calefacción, aire acondicionado y ACS.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Introducción



Capítulo 2 VIVIENDA DE REFERENCIA

2.1 DEFINICIÓN DE LA VIVIENDA

Para el análisis, y como se ha justificado, la vivienda objeto de análisis será una vivienda unifamiliar situada en Madrid, en la zona D3 peninsular, que pertenece a la zona Continental.

De acuerdo con el informe de IDAE ya citado⁵ SECH-SPAHOUSE, el tamaño medio de una vivienda unifamiliar en España es de 140,2 m², siendo de 150,6 m² en el caso de una vivienda unifamiliar en la región continental. Para el estudio inicial, se definirá por tanto una vivienda de 130 m² climatizables.

El número medio de estancias de un hogar español es de 8, incluyendo cocina y baños, esta cifra es superior si se trata de viviendas unifamiliares. En la zona continental, el número medio de estancias para una vivienda unifamiliar es de 9,4. La vivienda en cuestión tendrá 4 salas con aire acondicionado y contará con radiadores en todas las estancias.

En relación con el número de ocupantes por vivienda se ha considerado una tasa constante de 1 ocupante cada 33.3 m², que se corresponde con el valor medio de ocupación del Censo de Edificación 1991-2000 del INE, si bien la ocupación media de un hogar español de acuerdo con el informe anterior es de 2,7 personas. Se trata de un edificio de nueva construcción.

⁵ El Proyecto SECH-SPAHOUSE (IDAE), publicó un informe titulado Análisis del Sector residencial en España, donde aparecen datos estadísticos tanto de consumo como de otro tipo de características de los hogares españoles, que se han empleado como punto de partida.

2.2 ZONA CLIMÁTICA Y DEMANDA DE REFERENCIA

En España, existen tres climas diferenciados, a los que se hace referencia en la introducción: Mediterráneo, Continental y Atlántico-Norte; que a su vez se subdividen en zonas atendiendo a su severidad climática tanto en los meses de invierno, como en los de verano.

La *Figura 8* muestra la distribución de dichos climas en zonas en función de su Severidad Climática⁶ en la España peninsular y en las islas.

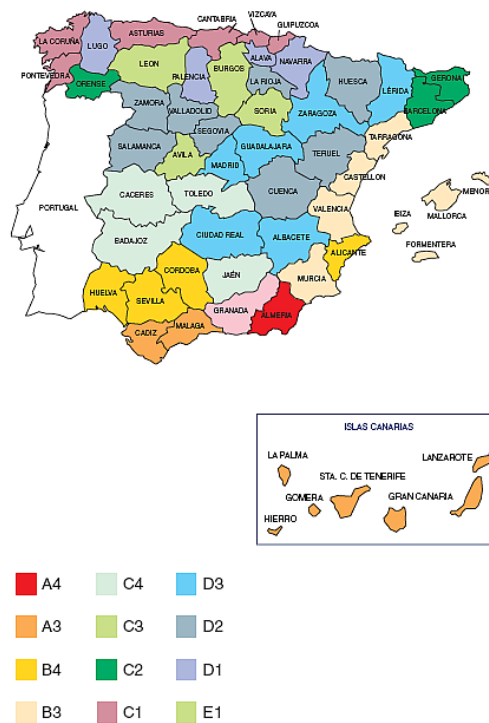


Figura 8: Zonas climáticas de España. Fuente: CTE Plus

A continuación, se muestran los datos meteorológicos obtenidos de fuentes públicas de AEMET que son necesarios para el posterior cálculo de las

⁶ Se explica en el Apartado Metodología empleada: Modelo de carga térmica.



necesidades térmicas de la vivienda, la metodología que se va a emplear se describe en el siguiente apartado.

La *Tabla 5* muestra los valores medios de temperatura e irradiación solar total para cada mes del año en la zona D3.

	T°C media	R media (W/m2)
Enero	6,2	78,4
Febrero	7,4	110,9
Marzo	9,9	157,7
Abril	12,2	201,7
Mayo	16,0	247,5
Junio	20,7	276,8
Julio	24,3	299,6
Agosto	23,9	266,9
Septiembre	20,5	198,9
Octubre	14,8	136,3
Noviembre	9,4	88,8
Diciembre	6,4	69,3

Tabla 5: Valores medios mensuales de temperatura exterior e irradiación solar.

Fuente: AEMET

Gráficamente, en la *Figura 9* se muestra la evolución horaria de las temperaturas y en la *Figura 10* se muestra la evolución de la radiación solar.

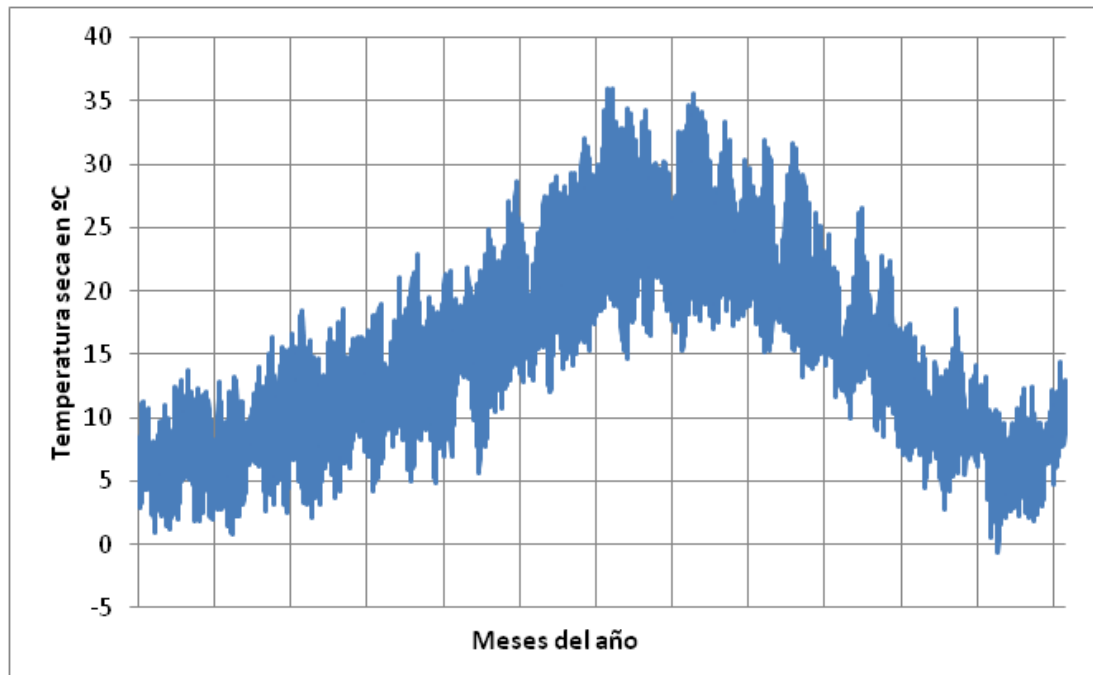


Figura 9: Temperaturas horarias. Fuente: AEMET

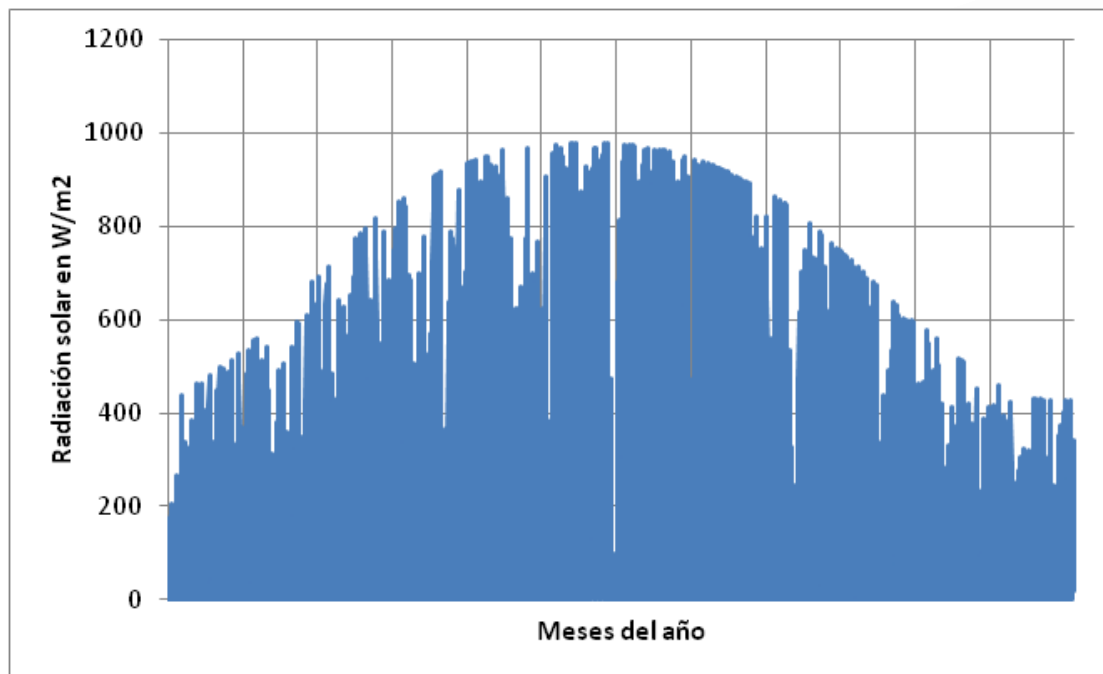


Figura 10: Radiación solar horaria W/m² Fuente: AEMET



Por último, es necesaria la temperatura mensual del agua de red, que se empleará para el agua caliente sanitaria, y que para la zona climática en cuestión se muestra en la *Tabla 6*.

Mes	Temperatura agua red (°C)
Enero	8
Febrero	8
Marzo	10
Abril	12
Mayo	14
Junio	17
Julio	20
Agosto	19
Septiembre	17
Octubre	13
Noviembre	10
Diciembre	8

Tabla 6: Temperatura agua de la red mensual zona D3. Fuente: IDAE

2.2.1 METODOLOGÍA: MODELO DE CARGA TÉRMICA

El modelo de carga térmica permite determinar la demanda térmica horaria tanto de calefacción como de refrigeración y de ACS para una vivienda, de forma global, sin tener en cuenta la orientación o las propiedades constructivas de la misma, únicamente a partir de la ubicación, datos geográficos de la población y ficheros públicos meteorológicos proporcionados por AEMET. Así mismo, se



hace distinción entre edificios existentes y de nueva construcción y de la calificación energética del edificio.

Para construir el modelo, se sigue el método de la Carga Térmica explicado en Artículo publicado por María Uris, José Ignacio Linares y Eva Arenas titulado “Size Optimization of a biomass-fired cogeneration plan CHP/CCHP based on Organic Rankine Cycle for a district network in Spain”, que se detalla a continuación. Además, se han contemplado los documentos publicados por IDEA: Guía técnica de condiciones climáticas exteriores de proyecto, Escala de Calificación Energética para edificios existentes y Escala de Calificación Energética para edificios de nueva construcción.

Calefacción y refrigeración

De acuerdo con el Código, en España, se establecen tres meses de invierno: enero, febrero y diciembre; y cuatro de verano: junio, julio, agosto y septiembre. Empleando los datos de temperatura y radiación solar global sobre una superficie horizontal, que se encuentran disponibles en los ficheros de Climas de Referencia del Ministerio de Fomento y de la AEMET, se ha procedido a realizar el cálculo de la demanda horaria de calefacción y refrigeración.

Inicialmente, de acuerdo con la *Ecuación 1*, se define el índice de Severidad Climática (SC), tanto para invierno como para verano.

$$SC = a \cdot R + b \cdot GD + c \cdot R \cdot GD + d \cdot R^2 + e \cdot GD^2 + f$$

Ecuación 1: Índice de Severidad Climática

Donde R se define como el valor medio acumulado de la radiación solar total sobre una superficie horizontal, expresado en kWh/m², calculado a partir de r que representa los valores horarios de la irradiancia solar directa y difusa



proporcionados en los ficheros *.met de Climas de Referencia del Ministerio de Fomento, como se recoge en la *Ecuación 2*.

$$R = \frac{\sum_{k=1}^{24 \cdot Nd \cdot Nm} r_k}{N_m}$$

Ecuación 2: Cálculo de R

La variable GD representa los Grados Día para una Temperatura Base de 20°C, tanto para invierno como para verano, según define la normativa española. La *Ecuación 3*, muestra los detalles de obtención de dichos valores.

$$GD = \frac{\sum_{k=1}^{24 \cdot Nd \cdot Nm} \Delta T_k}{24 \cdot N_m}$$

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

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

Ecuación 3: Cálculo de GD

Los valores de los coeficientes a,b,c,d,e y f, para invierno (SCI) y para verano (SCV) se muestran en la *Tabla 7*:

Coeficientes	Invierno	Verano
a	-8,35E-03	3,72E-03
b	3,72E-03	1,41E-02
c	-8,62E-06	-1,87E-05
d	4,88E-05	-2,05E-06
e	7,15E-07	-1,39E-05
f	-6,81E-02	-5,43E-01

Tabla 7: Coeficientes para el cálculo de la Severidad Climática



Así, en la *Tabla 8* se recogen los valores que se obtienen con los datos climáticos de Madrid

	Invierno	Verano
N_m	3	4
N_d	90	122
R	61,5	191,0
GD	400,8	99,0

Tabla 8: Valores R y GD para Madrid

Una vez obtenidos estos valores, se puede proceder a calcular el valor de los índices de Severidad Climática, *Tabla 9*. Este índice permite clasificar los territorios de la península en zonas climáticas, representadas por una letra para la Severidad Climática de Invierno y un número para la Severidad Climática de Verano. Como se puede comprobar de acuerdo con la *Tabla 10* y la *Tabla 11*, Madrid se encuentra en la zona climática D3.

	Invierno	Verano
SC	1,00	1,00
Calificación	D	3

Tabla 9: Valores de SC para Madrid

A	B	C	D	E
$0 < SCI \leq 0,23$	$0,23 < SCI \leq 0,5$	$0,5 < SCI \leq 0,93$	$0,94 < SCI \leq 1,51$	$SCI > 1,51$

Tabla 10: Intervalos para la zonificación de invierno

1	2	3	4
$SCV \leq 0,5$	$0,5 < SCV \leq 0,83$	$0,83 < SCV \leq 1,38$	$SCV > 1,38$

Tabla 11: Intervalos para la zonificación de verano



Mediante el índice de Severidad Climático obtenido y la *Ecuación 4*, donde los parámetros α y β para una vivienda unifamiliar se recogen en la *Tabla 12*, se obtienen las demandas de referencia, para los tres meses de invierno y los cuatro de verano mencionados anteriormente.

$$D \left(kWh/m^2 \right) = \alpha + \beta * SC$$

Ecuación 4: Demanda de Referencia

Los valores de los parámetros α y β que permiten calcular la demanda térmica de referencia, son diferentes en función de si se trata de viviendas unifamiliares, que son los que se muestran dado que es el caso de estudio, o bloques de viviendas. Además, son diferentes según se trate de edificios existentes (*Tabla 12*) o de nueva construcción (*Tabla 13*).

	Invierno	Verano
α	32,08	-6,46
β	117	33,96
D (kWh/m ²)	148,65	27,45

Tabla 12: Demandas de Referencia a partir de SC para edificios existentes

	Invierno	Verano
α	9,29	-4,24
β	54,98	20,41
D (kWh/m ²)	64,07	16,14

Tabla 13: Demandas de Referencia a partir de SC para edificios nuevos



Con el fin de obtener un valor para la demanda térmica de cada hora⁷ se realiza una aproximación mediante el polinomio de Taylor de primer orden aplicado a la *Ecuación 1* que determina el SC definida anteriormente:

$$\begin{aligned}
 SC &\approx SC_0 + \rho * (R - R_0) + \delta * (GD - GD_0) \\
 &= SC_0 - \rho * R_0 - \delta * GD_0 + \frac{\rho}{N_m} * \sum_{k=1}^{24 * N_d * N_m} r_k + \frac{\delta}{24 * N_m} \\
 &\quad * \sum_{k=1}^{24 * N_d * N_m} \Delta T_k
 \end{aligned}$$

Ecuación 5: Polinomio de Taylor de SC

Los parámetros ρ y δ vienen definidos en la *Ecuación 6* y la *7*, el subíndice 0 indica los valores obtenidos empleando los datos de los meses que determina la norma.

$$\rho = \left. \frac{\partial SC}{\partial R} \right)_0 = a + c * GD_0 + 2 * d * R_0$$

Ecuación 6: Cálculo de ρ

$$\delta = \left. \frac{\partial SC}{\partial GD} \right)_0 = b + c * R_0 + 2 * e * GD_0$$

Ecuación 7: Cálculo de δ

	Invierno	Verano
ρ	-5,80E-03	1,09E-03
δ	3,76E-03	7,77E-03

Tabla 14: Valores de ρ y δ de referencia

⁷ que se precisa para estimar el coste de la energía eléctrica del Sistema aerotérmico a partir de los precios horarios de la energía de las tarifas PVPC, como se expone más adelante



Finalmente, se sustituye en la *Ecuación 4*, asumiendo una distribución uniforme del valor constante y se obtiene la expresión para la demanda térmica de la hora k :

$$D_k = \frac{\alpha + \beta * (SC_0 - \rho * R_0 - \delta * GD_0)}{24 * N_d * N_m} + \frac{\beta * \rho}{N_m} * r_k + \frac{\beta * \delta}{24 * N_m} * \Delta T_k$$

Ecuación 8: Demanda térmica en la hora k

$$D_{k \text{ invierno}}^{\text{edificios antiguos}} = 0,002152018 - 0,226 * r_k + 0,0061155133 * \Delta T_k$$

$$D_{k \text{ verano}}^{\text{edificios antiguos}} = -0,000489852 - 0,00924 * r_k + 0,002748264 * \Delta T_k$$

Ecuación 9: Demanda térmica en la hora k para invierno y verano en edificios antiguos

$$D_{k \text{ invierno}}^{\text{edificios nuevos}} = 0,000118554 - 0,106 * r_k + 0,002873594 * \Delta T_k$$

$$D_{k \text{ verano}}^{\text{edificios nuevos}} = -0,0003249292 - 0,00556 * r_k + 0,00165171 * \Delta T_k$$

Ecuación 10: Demanda térmica en la hora k para invierno y verano en edificios nuevos

Esta demanda térmica se puede extender a otros meses del año, distintos de los establecidos anteriormente, simplemente aplicando la *Ecuación 8* a los meses deseados, variando únicamente r_k y ΔT_k . Para este análisis, la demanda térmica de invierno se ampliará incluyendo los meses de marzo y noviembre, cuyas temperaturas medias son inferiores a 10°C . La demanda térmica de verano se mantendrá para los meses de junio, julio, agosto y septiembre. Los valores totales anuales obtenidos se muestran en la *Tabla 15*.



	Invierno: Enero, Febrero, Marzo, Noviembre y Diciembre	Verano: Junio, Julio, Agosto y Septiembre
Edificios antiguos	242 kWh/ m ²	32 kWh/ m ²
Edificios nuevos	67,24 kWh/ m ²	19,25 kWh/ m ²

Tabla 15: Valores totales anuales de demanda térmica de refrigeración y calefacción. Fuente: Elaboración propia

Así mismo, aplicando un factor a los valores de demanda de calefacción y refrigeración de referencia, se obtienen los límites de dichos valores en función de la calificación energética del edificio. Dichos valores se muestran en la *Tabla 16*.

Calificación energética	Coefficiente de corrección para calefacción en el caso de Madrid	Coefficiente de corrección para calefacción en el caso de Madrid
A-B	0,37	0,46
B-C	0,60	0,66
C-D	0,93	0,93
D-F	1,43	1,37

Tabla 16: Factores de corrección en función de la calificación energética del edificio. Fuente: IDAE



Figura 11: Demandas de referencia anuales según calificación energética en Madrid. Fuente: IDAE

La Figura 11 muestra los valores de las demandas térmicas según la calificación energética del edificio, nuevamente dichas demandas consideran sólo los meses de enero, febrero y diciembre para demanda de calefacción y los de junio, julio, agosto y septiembre para demanda de refrigeración. Los valores mostrados en la Tabla 15, que son los que se utilizarán en el análisis, incluyen los meses de marzo y noviembre en las necesidades térmicas de calor, por lo tanto no son comparables; los valores de la Tabla 12 y la Tabla 13 son los que se corresponden con la Figura 11.

Para el caso de estudio, se partirá del consumo de referencia para edificios nuevos, que se corresponde con una calificación energética D.

Antes de proceder al análisis del caso señalado, se muestra a modo de comparación y como base, lo que se obtendría con las demandas de referencia, tanto para edificios antiguos como de nueva construcción, expresado de forma general por m² de vivienda.

Caso de referencia para edificios antiguos

La *Figura 12* muestra la demanda térmica horaria expresada en W/m^2 para los meses de enero, febrero, junio, julio, agosto, septiembre y diciembre que establece el Código español. La *Figura 13* incluye, además, los meses de marzo y noviembre, que será la empleada en el análisis que se va a realizar en este proyecto.

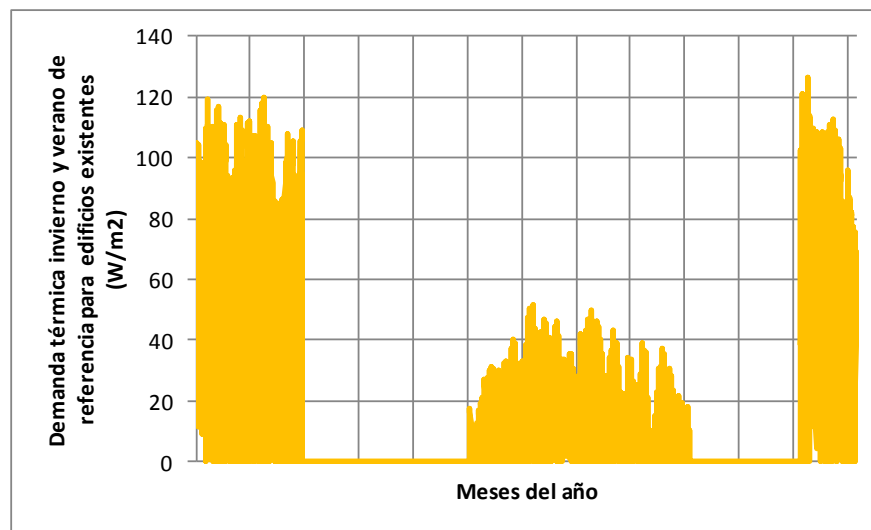


Figura 12: Demanda térmica horaria w/m^2 para tres meses de invierno y cuatro de verano, edificios antiguos. Fuente: Elaboración Propia

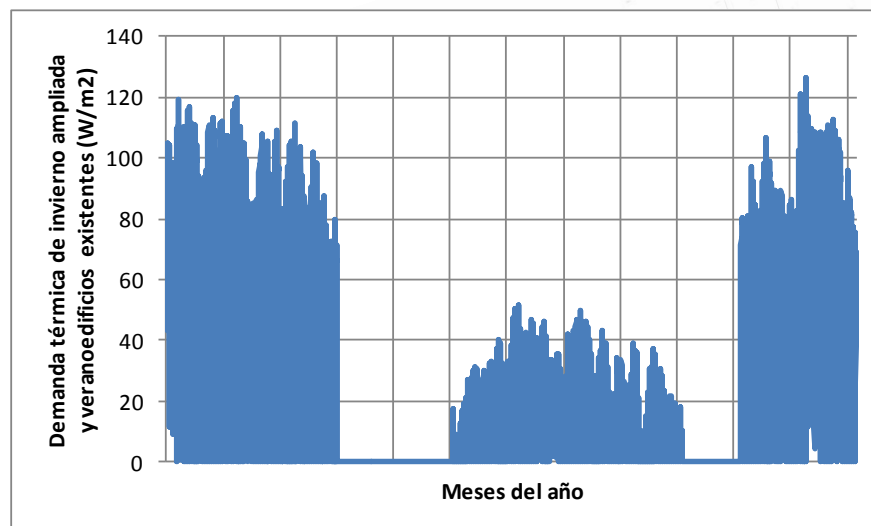


Figura 13: Demanda térmica horaria W/m^2 ampliada a cinco meses, edificios antiguos. Fuente: Elaboración propia

Se muestran también las curvas monótonas, con el fin de identificar los valores máximos demandados.



Figura 14: Curva monótona de demanda térmica horaria de calefacción, edificios antiguos. Fuente: Elaboración Propia



Figura 15: Curva monótona de demanda térmica horaria de refrigeración, edificios antiguos. Fuente: Elaboración Propia

Caso de referencia para edificios de nueva construcción

De forma análoga, se muestran las mismas gráficas para edificios de nueva construcción, que serán las que emplearemos.

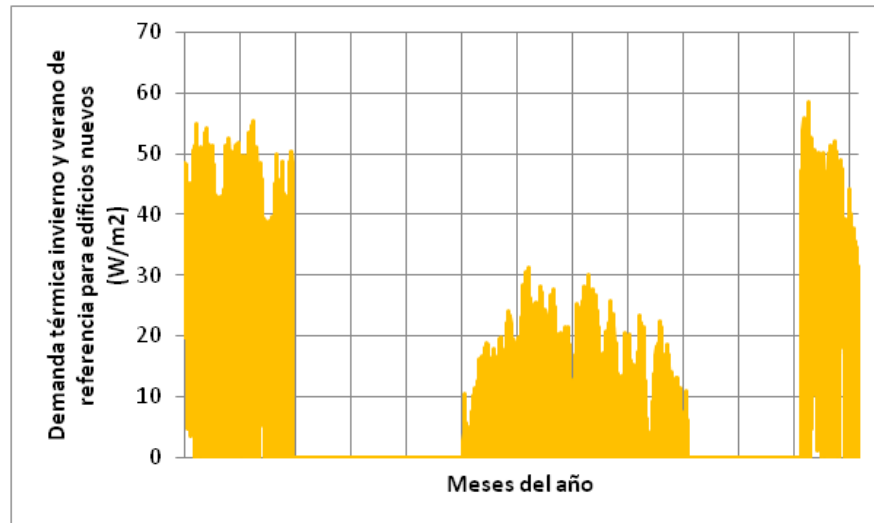


Figura 16: Demanda térmica horaria w/m^2 para tres meses de invierno y cuatro de verano, edificios nuevos. Fuente: Elaboración Propia

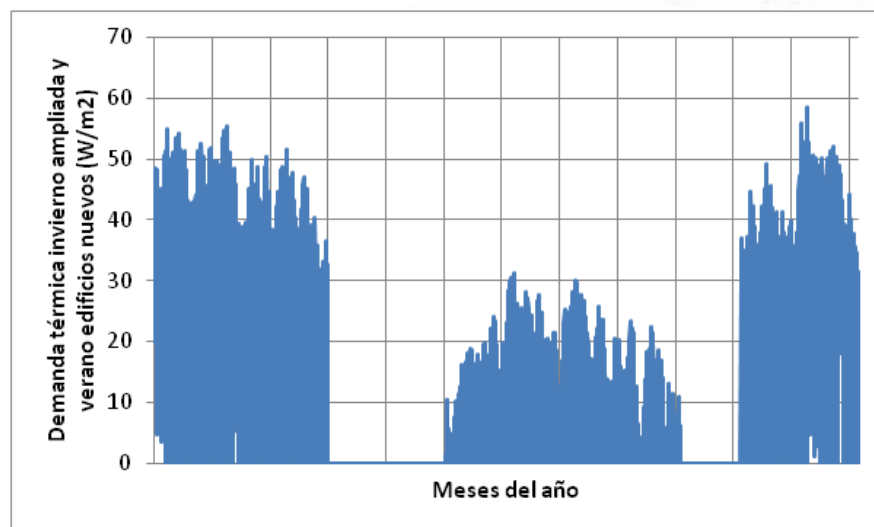


Figura 17: Demanda térmica horaria W/m^2 ampliada, edificios nuevos. Fuente: Elaboración Propia



Figura 18: Curva monótona de demanda térmica horaria de calefacción, edificios nuevos. Fuente: Elaboración Propia



Figura 19: Curva monótona de demanda térmica horaria de refrigeración, edificios nuevos. Fuente: Elaboración Propia



Agua Caliente Sanitaria (ACS)

En el caso del Agua Caliente Sanitaria, ACS, el cálculo es más sencillo; ya que se realiza con carácter mensual y se considera que, gracias a la existencia de acumuladores, las necesidades diarias se reparten de forma uniforme a lo largo de las horas del día.

La Ecuación 11 muestra cómo se lleva a cabo dicho cálculo.

$$DACS_k = \frac{V_d * \rho_a * c_a * (T_u - T_r)}{24}$$

Ecuación 11: Demanda horaria de ACS

El término V_d , es el volumen diario de agua caliente sanitaria, para uso residencial, se establece en 30 litros por persona y día. Adicionalmente, la ocupación residencial de viviendas unifamiliares, se establece en 33,33 m² por persona. Esto nos permite expresar la demanda de ACS en kWh/m², siguiendo el mismo patrón que para las demandas de calefacción y refrigeración.

Los términos ρ_a y c_a son respectivamente la densidad y el calor específico del agua.

ρ_a	1 kg/l
c_a	4,18 J/(kg*K) = 0,0016 kWh/ (kg*°C)

Tabla 17: Propiedades del agua

En cuanto a las temperaturas, T_u , es la temperatura de referencia, fijada a 60°C, y T_r es la temperatura del agua de la red, que viene determinada por la zona climática, y que se ha mostrado en la caracterización de la zona climática de referencia, en la Tabla 6.



La demanda anual de ACS de referencia asciende a $17,7 \text{ kWh/m}^2$, que se reparten a lo largo del año según el perfil mostrado en la *Figura 20*:

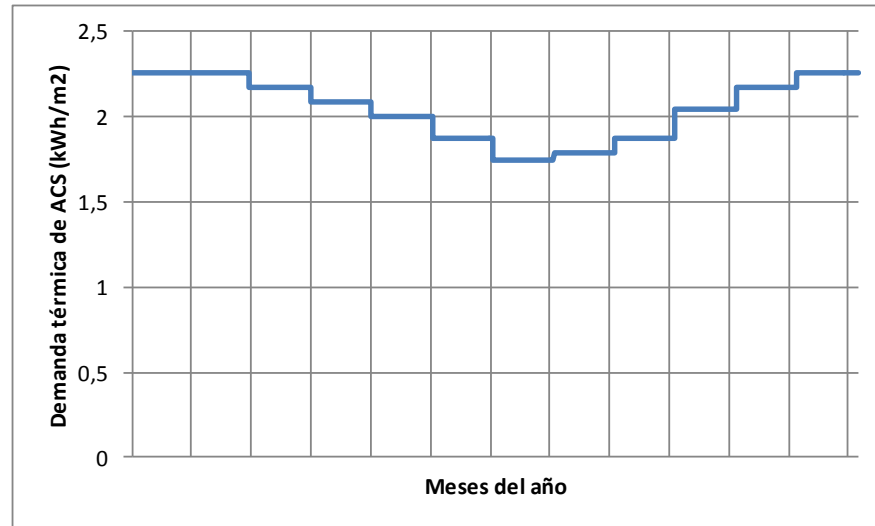


Figura 20: Demanda térmica de ACS. Fuente: Elaboración Propia

Esta demanda es independiente de la calificación energética del edificio, y de si es antiguo o de nueva construcción. Sin embargo, el Documento Básico HE de ahorro de energía, de acuerdo con la sección HE4, establece una contribución solar mínima del 60% para edificios nuevos, que se aplicaría sobre la demanda térmica total, reduciéndola a $7,08 \text{ kWh/m}^2$. Para el caso de estudio, ignoraremos esta contribución solar y tomaremos el valor inicial de $17,7 \text{ kWh/m}^2$. Además, como se explica más adelante, la energía producida mediante bomba de calor también se considera renovable.

Otro aspecto a considerar es si tomamos una temperatura de referencia distinta de 60°C . Lo que establece el Código [4] es que esto se puede hacer, pero entonces el volumen de agua demandado se modificaría de forma inversamente proporcional, según la Ecuación 12 de forma que el resultado, es decir, la energía necesaria para el suministro de ACS es la misma.



$$D(T) = \sum_1^{12} D_i(T)$$

$$D_i(T) = D_i(60^\circ\text{C}) * \left(\frac{60 - T_r}{T - T_r} \right)$$

Ecuación 12: Demanda de ACS anual para una temperatura de referencia T

Donde:

$D(T)$: Demanda de ACS anual a la temperatura T

$D_i(T)$: Demanda de ACS para el mes i a la temperatura T

$D_i(60^\circ\text{C})$: Demanda de ACS para el mes i a 60°C

T: Temperatura del acumulador final

T_r : Temperatura del agua de red para el mes i

Para modelizar el suministro de ACS con un sistema aerotérmico mediante bomba de calor, se ha supuesto que la energía necesaria se distribuye de forma uniforme a lo largo de todas las horas del día en que el sistema funciona en modo calefacción. En los meses de verano en la demanda de energía para el calentamiento del agua se concentra en horas madrugadas que no se precisa prácticamente, el funcionamiento en modo refrigeración. En los meses de verano, se concentra la producción de ACS entre las 0 h y las 6 h de la mañana, produciendo en cada hora, cuatro veces más. La demanda de refrigeración en estas horas se desprecia. En las siguientes tablas se muestra la distribución de la demanda térmica de refrigeración a lo largo de las horas del día en los meses de verano para justificar que estas necesidades térmicas pueden ser ignoradas. En la *Figura 21*, las seis horas mencionadas anteriormente se corresponden con las seis primeras columnas. Los valores mostrados en rojo y próximos a esta tonalidad son nulos.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
 ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
 INGENIERO INDUSTRIAL

Vivienda de referencia

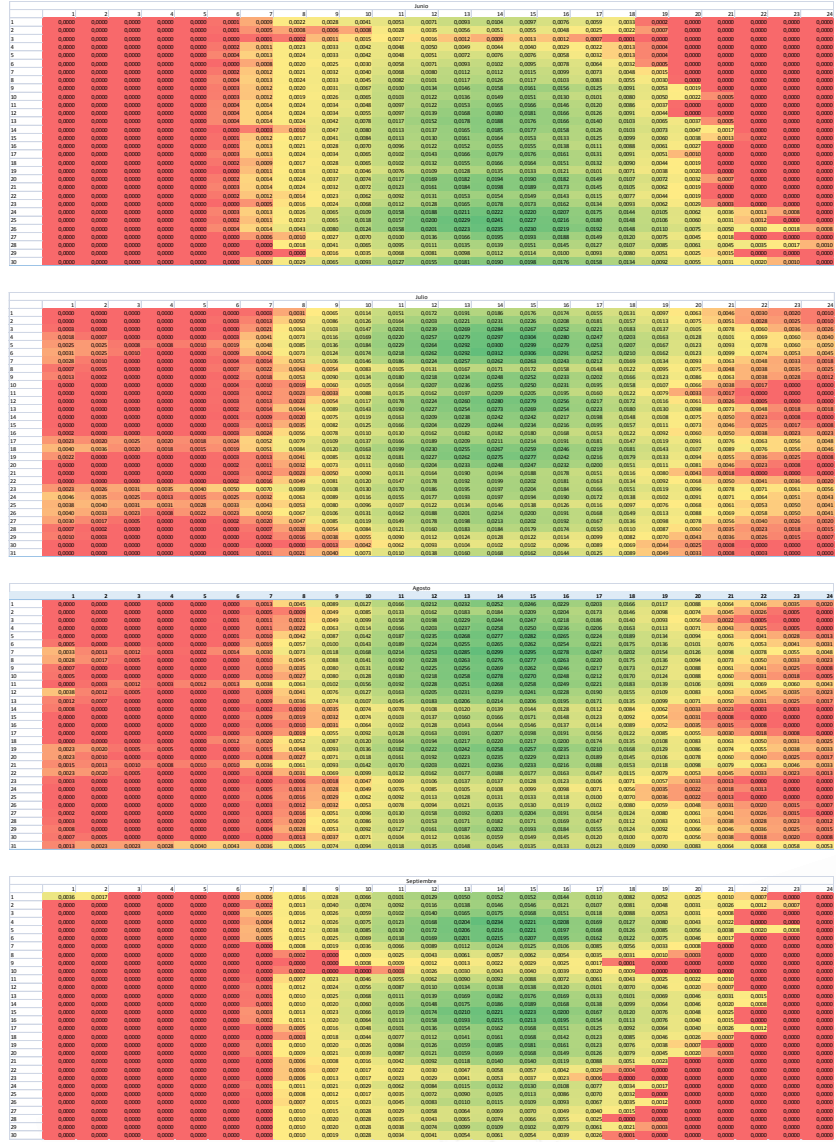


Figura 21: Demanda térmica horaria de refrigeración por día (fila) y hora (columna) para los meses de junio, julio, agosto y septiembre. Fuente: Elaboración Propia

De esta forma, para un día de verano, la energía de ACS pasaría a estar distribuida de la siguiente forma:

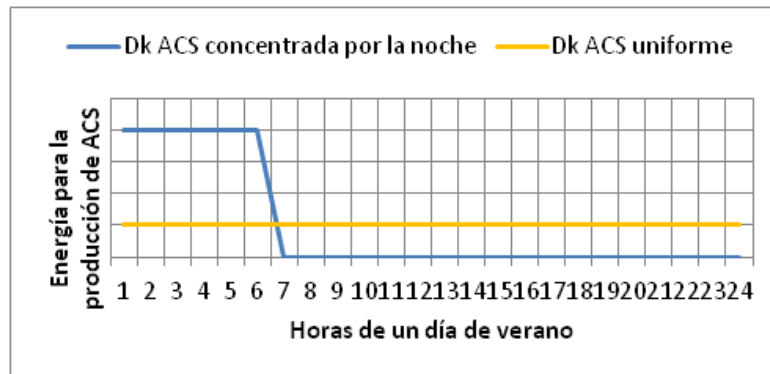


Figura 22: Producción concentrada de ACS durante la noche. Fuente:
Elaboración Propia

2.2.2 RESUMEN DE RESULTADOS

Por último, se muestra un resumen con los datos obtenidos a partir de lo expuesto anteriormente. Se ha considerado una vivienda de referencia de nueva construcción, de 130 m² climatizados.

Servicio	Energía útil (kWh/m ²)	Energía útil (kWh)	Valor máximo (kWh/m ²)	Valor máximo (kWh)
Calefacción	100,4	13.048	0,058	7,6
ACS	17,9	2.327	0,030 ⁸	3,9
Refrigeración	19,0	2.474	0,0312	4,0
TOTAL	137,3	17.849	-	-

Tabla 18 :Energía útil necesaria para los servicios de la vivienda (kWh)

⁸ Se corresponde con un día de verano en el que la demanda se concentra en las horas nocturnas.



2.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS CONSUMOS ELÉCTRICOS CONVENCIONALES DE LA VIVIENDA

En este apartado se lleva a cabo el análisis de los consumos eléctricos convencionales de la vivienda. Para posteriormente analizar la viabilidad de almacenamiento en horas valle con batería en el caso de la aerotermia, es necesario considerar la electricidad consumida tanto por el sistema aerotérmico como por los usos convencionales eléctricos de la vivienda, de forma que la batería contribuya a la optimización económica de la curva de carga de la vivienda.

En esta sección también se describe el procedimiento para calcular el coste de los consumos eléctricos horarios, empleando el PVPC como referencia, por ser la tarifa regulada de electricidad.

2.3.1 PRECIO VOLUNTARIO AL PEQUEÑO CONSUMIDOR: PVPC

Para valorar el precio de la energía eléctrica consumida por la vivienda, tanto con sistema aerotérmico como en el resto de los casos, como se ha mencionado, se utiliza el denominado Precio voluntario para el pequeño consumidor, PVPC, que sustituyó a la Tarifa de Último recurso desde el 1 de abril de 2014⁹.

El PVPC es una estructura tarifaria aplicable a los consumidores de baja tensión con potencia contratada inferior a 10 kW. Esta oferta tarifaria es ofrecida

⁹ Anteriormente a esa fecha, existía la antigua Tarifa de Último Recurso (TUR), y el precio de las tarifas 2.0 se determinaba mediante una subasta trimestral, la subasta CESUR, que establecía el precio de la energía para los tres meses siguientes. El sistema fue sustituido porque en la subasta de diciembre de 2013 resultó un precio elevado.



por las empresas comercializadoras de referencia¹⁰ y es a la que se acogen los consumidores que contratan menos de 10 kW en baja tensión si no desean acogerse a una oferta de suministro en el mercado libre. Se utiliza el esquema de los PVPC porque proporciona precios de la energía que varían horariamente al igual que el consumo de energía para el sistema de aerotermia.

La metodología de cálculo de los precios voluntarios para el pequeño consumidor se define en el Real decreto 266/2014 e incluye la estructura de peajes de acceso y cargos en vigor en cada momento. El Artículo 7 del citado Real Decreto detalla dicha estructura¹¹ y se muestra en el Anexo.

Es decir, se trata de una tarifa binómica con un término de potencia (€/kW-año) y un término de energía (€/kWh) variable en cada hora.

La facturación anual por la potencia contratada será:

$$FPU = TPU * Potencia contratada$$

La facturación por energía consumida a lo largo de un período, generalmente un mes, es la suma a lo largo del período de la energía consumida en cada hora por el precio de la energía. Dicho precio de la energía se calcula sumando una serie de componentes que se detallan en los Artículos 9 a 12 del citado Real decreto y son:

¹⁰ Según el art 3 del Real decreto 216/2014, de 28 de marzo, por el que se establece la metodología de cálculo de los precios voluntarios para el pequeño consumidor de energía eléctrica y su régimen jurídico de contratación son comercializadoras de referencia aquellas comercializadoras que suministran a más de 100.000 clientes por parte del grupo empresarial y aquellas otras de menor tamaño y que superen los 25.000 clientes en el último año y cumplan una serie de condiciones económicas

¹¹ Ya actualizado el apartado 2 por el art. único.1 del Real Decreto 469/2016, para introducir las modificaciones relativas al margen de comercialización (componentes fija y variable)



- *Precio de la energía en mercados diario e intradiarios incrementado con el Coeficiente de pérdidas del peaje de acceso de aplicación al suministro en la hora h*
- *Coste de los servicios de ajuste*
- *Coste del término variable del correspondiente peaje de acceso*
- *Coste correspondiente a los pagos por capacidad y al servicio de interrumpibilidad*
- *Coste asociado a la financiación del Operador del Sistema, al Operador del Mercado y el Coste de Comercialización variable.*

Todos estos costes a nivel horario son calculados por el Operador del Sistema y publicados el día anterior en su página web¹² para los tres peajes de baja tensión 2.0 a que se puede acoger el consumidor PVPC (peaje por defecto, 2.0 A; peaje con discriminación horaria de dos períodos 2.0 DHA y peaje supervalle de tres períodos 2.0 DHS). Estos conceptos, ya incrementados con el coste de la energía dan lugar a los Términos de energía de las tarifas. Como también se ha indicado, existe un término fijo función de la potencia contratada (máxima) que asume el cliente. La suma de ambos conceptos, término variable o de energía y término fijo o de potencia son incrementados con el Impuesto de la electricidad (5,11269632%) y el IVA (21%) dando lugar al coste final que asume el cliente.

A continuación, la *Figura 23* muestra como ejemplo para un día dado los términos de facturación de energía de PVPC.

¹² <https://www.esios.ree.es/es/pvpc>

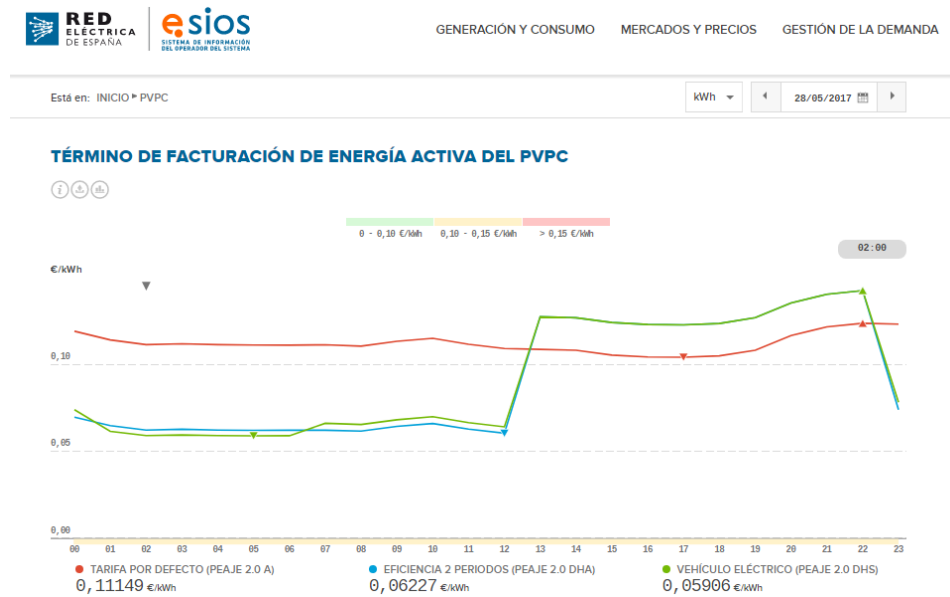


Figura 23: Términos de facturación de energía activa del PVPC. Fuente: ESIOS

El detalle de los componentes de cada precio horario también está disponible en ESIOS y se muestra a continuación

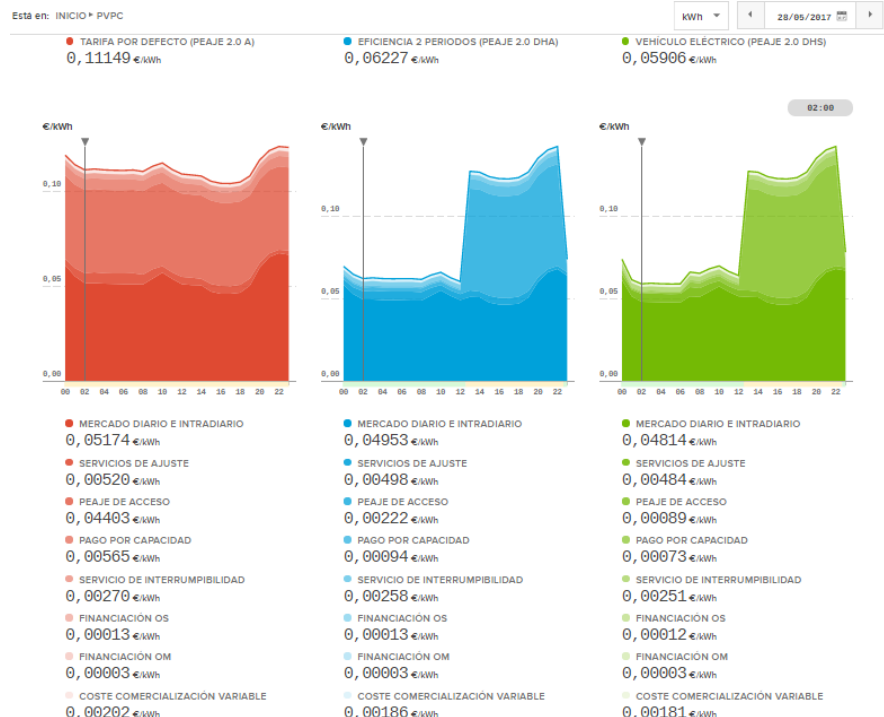


Figura 24: Detalle de los componentes del termino de energía de las tarifas 2.0, 2.0 DHA y 2.0 DHS en una determinada hora y a lo largo del día. Fuente: ESIOS

En la Figura 24 puede observarse como varía el precio de la energía a lo largo de las 24 horas de un día en función de la tarifa PVPC a que se acoge el cliente.

En la Figura 25 se muestra la curva monótona de precios según la tarifa 2.0 y la tarifa 2.0 DHA a lo largo de un año.

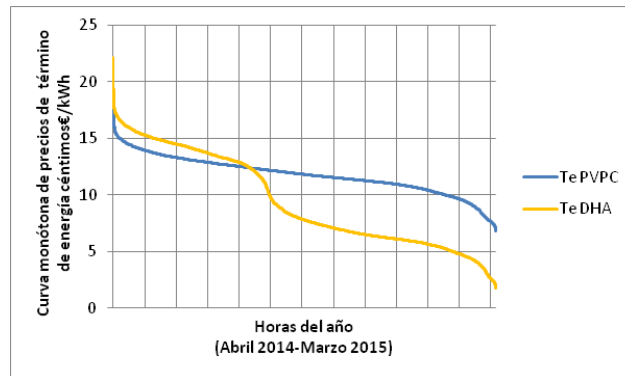


Figura 25: Curva monótona de precios de término de energía para distintas tarifas. Fuente: Elaboración Propia.

En la web Esos, están almacenados desde el 1 de abril de 2014 el coste unitario del término de energía para las tres tarifas PVPC.

El coste de la energía en estos tres periodos anuales son los que se van a considerar para valorar el coste de la electricidad de la vivienda tipo en los distintos supuestos analizados.

2.3.2 PERFIL DE CONSUMO

De acuerdo con la Orden Ministerial IET/290/2012, de 16 de febrero de 2012, todos los usuarios deberán contar con un contador inteligente equipado en el año 2018, que se irán implantando de forma paulatina. La Figura 26 muestra el porcentaje de clientes domésticos por comunidad autónoma que poseen este contador inteligente a fecha de mayo de 2017, que como se puede observar son una mayoría, 81,2% en Madrid.

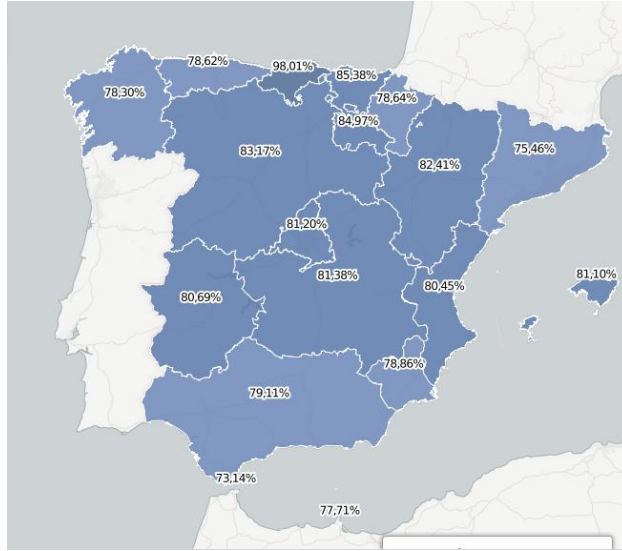


Figura 26: Porcentaje de clientes domésticos con contador inteligente telegestionado por Comunidad autónoma. Fuente: SIMEL (1/05/2017)

Coste del término de energía

Con el fin de caracterizar el consumo eléctrico de la vivienda se ha creado un perfil propio de consumo a medida. Se tomarán como referencia los datos de extraídos de diversas fuentes que muestran el consumo medio anual de electrodomésticos por hogar, así como otras características complementarias: potencia instantánea máxima, horas de funcionamiento diarias y factor de utilización horario y el número de días a la semana que están en funcionamiento.

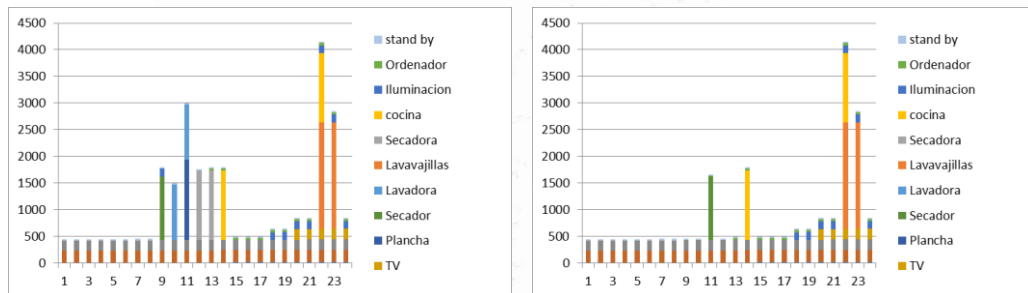
Además, se ha incluido un factor que representa los consumos de carácter aleatorio que pueden tener lugar en la vivienda.



	Refrigerador	Congelador	TV	Plancha	Secador	Lavadora	Lavavajillas	Secadora	Cocina	Iluminación	Ordenador	Stand y
Referencia consumo anual (kWh)	662	563	263	200	100	255	264	255	737	410	172	231
Potencia instantánea máx. (W)	227	193	200	1500	1200	1048	2000	1300	1300	140	39	26
Horas funcionamiento/día	24	24	4	1	0,25	2	2	2	2	8	12	24
Factor utilización hora	0,4	0,3	1,00	0,80	1,00	0,40	0,20	0,40	0,60	1,00	1,00	1,00
KWh/día	1,90	1,39	0,80	1,20	0,30	0,84	0,80	1,04	1,56	1,12	0,47	0,63
Días de uso a la semana	7	7	7	4	7	5	6	5	7	7	7	7
Consumo anual (kWh)	695,1	506,7	292	250	110	219	250	271	569	410	172	231
% del TOTAL	17%	13%	7%	6%	3%	5%	6%	7%	14%	10%	4%	6%

Tabla 19: Consumo por tipo de electrodoméstico.

Con el fin de acercarse lo máximo posible a una situación real, se repartirán los consumos a lo largo de las horas del día y de los días de la semana atendiendo a cuatro tipologías de día, invierno o verano, y laborable o festivo respectivamente, según muestra la *Figura 27*.



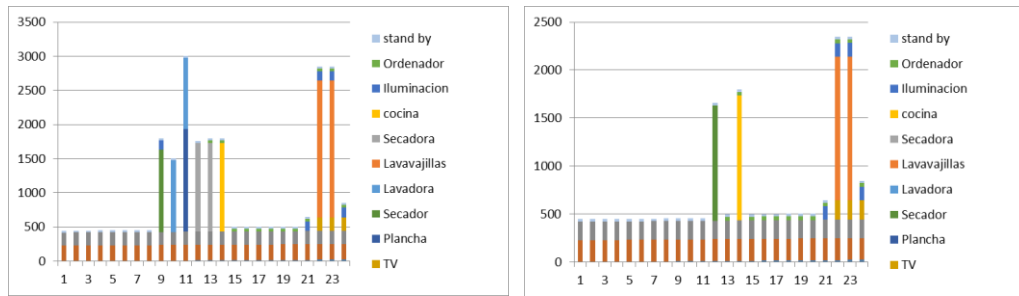


Figura 27: Caracterización de los consumos convencionales de la vivienda en base a días tipo: invierno laborable y festivo y verano laborable y festivo. Fuente: Elaboración Propia.

También se muestran unos gráficos con los consumos horarios tanto en términos de energía horaria como de potencia instantánea horaria máxima, a lo largo de un año, de acuerdo con los perfiles anteriores.

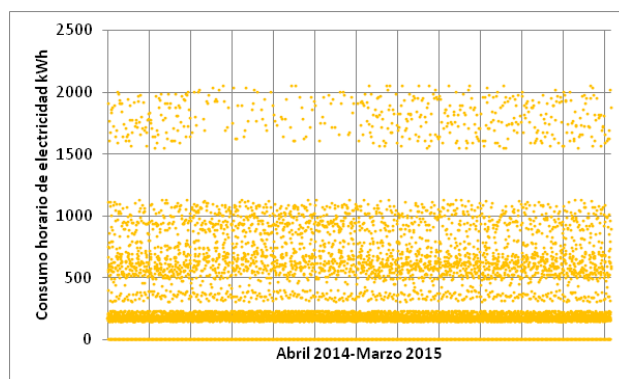


Figura 28: Consumo eléctrico horario. Fuente: Elaboración propia

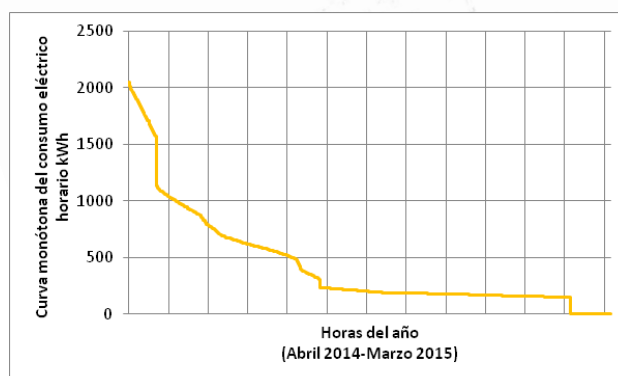


Figura 29: Curva monótona de consumo eléctrico horario. Fuente: Elaboración propia

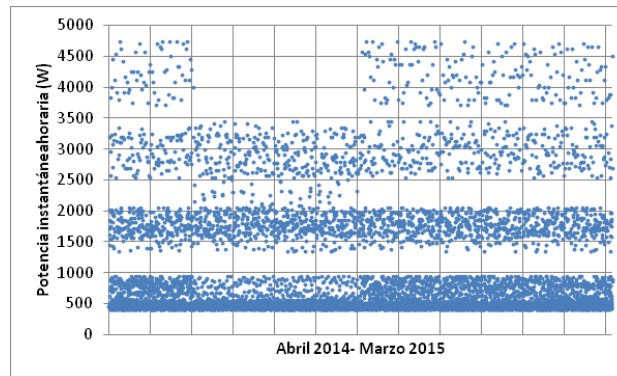


Figura 30: Potencia instantánea horaria. Fuente: Elaboración propia

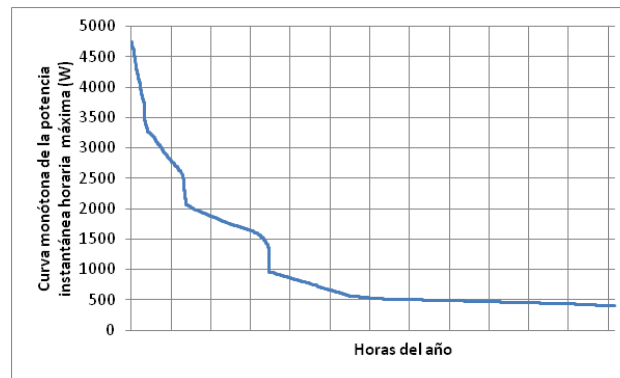


Figura 31: Curva monótona de potencia instantánea. Fuente: Elaboración propia

A partir de los perfiles horarios de los días tipo, se ha creado una curva de consumo horario anual.

Para los consumos de la vivienda convencional, los precios horarios de la energía se han obtenido de la base de datos de REE¹³ extrayendo la serie

- 1013: Término de facturación de energía activa del PVPC peaje por defecto (2.0)

Cuando se analice la viabilidad de la vivienda con sistema de aerotermia, así como la incorporación de la batería se tendrá en cuenta la posibilidad de emplear

¹³ <https://www.esios.ree.es/es>



la tarifa de discriminación horaria 2.0 DHA que se obtiene extrayendo la siguiente serie:

- 10230¹⁴: Término de facturación de energía activa del PVPC eficiencia 2 periodos (DHA) suma componentes.

Como producto de los consumos horarios, que totalizan 3.775 kWh, por la serie de precios se obtiene el coste de la energía para la vivienda convencional con la tarifa PVPC 2.0.

Periodo considerado	Coste energía PVPC 2.0
Abril 2014-marzo 2015	462
Abril 2015-marzo 2016	446
Abril 2016-marzo 2017	427
Coste Término energía (€)	445

Tabla 20: Coste anual del término de energía por integración de los consumos horarios modelados y el precio horario publicado por Esios. Fuente: Elaboración Propia

Coste del Término de potencia.

Del análisis de la serie de potencia demandada se observa que la máxima potencia instantánea demandada asciende a 4,7 kW con lo que la potencia contratada sería de 5,5 kW. Por tanto, el coste anual del término fijo sería:

¹⁴ Serie total 1014



*Coste del término fijo = (Peaje de acceso + comercialización) **

$$\text{Potencia contratada} = 41,16 \frac{\text{€}}{\text{kWh-año}^{15}} * 5,5 \text{ kW} = 226\text{€/año (antes de impuestos)}$$

Y el importe anual, incluyendo el alquiler de equipo de medida, el impuesto de electricidad y el IVA ascendería a:

Importe anual

$$\begin{aligned} &= ((\text{Término fijo} + \text{Término de potencia}) \\ &* (1 + \text{Impuesto Electricidad, IE}) \\ &+ \text{alquiler equipo medida}) * (1 + \text{IVA}) \\ &= ((445 + 226) * (1 + 5,11269632\%) + 9,72) * (1 + 21\%) \\ &= 866\text{€/año} \end{aligned}$$

¹⁵ Importe del término fijo o de potencia de las tarifas de baja tensión de menos de 10 kW contratados



Capítulo 3 ANÁLISIS Y COSTES DE LOS POSIBLES SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN

3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS DISTINTAS ALTERNATIVAS Y CONSUMOS DE ENERGÍA

3.1.1 AEROTERMIA

La Bomba de Calor aerotérmica, aire-agua, que será la empleada en el análisis, es una máquina termodinámica que permite aprovechar la energía del ambiente exterior para convertirla en frío, calor para calefacción y/o agua caliente sanitaria (ACS). Al aprovechar ese calor del medio (que además es renovable), generan mucha más energía que la eléctrica que consumen, lo que las convierte en máquinas de elevada eficiencia.

Antes de proceder a justificar la selección de una bomba de calor para la aplicación que se persigue en el proyecto y de evaluar los consumos específicos para el caso de estudio, se muestra una breve explicación del funcionamiento de una bomba de calor, los tipos que existen y su papel dentro del marco europeo y de los objetivos para el Clima mencionados en el apartado introductorio, así como del parque de bombas de calor nacional.

Funcionamiento de una bomba de calor

Una bomba de calor es una máquina termodinámica que transfiere calor de un foco frío a un foco caliente con una gran eficacia mediante una aportación relativamente pequeña de trabajo en forma de energía eléctrica.



Para ello, la bomba de calor utiliza un fluido refrigerante en un ciclo termodinámico cerrado, que transporta el calor invirtiendo su flujo natural, gracias al trabajo realizado por el compresor, es decir del foco frío al foco caliente. Las bombas de calor reversibles, permiten el funcionamiento de la bomba de calor, tanto en modo calefacción como en modo refrigeración, circulando el gas refrigerante en un sentido u otro, y por consiguiente, invirtiendo el flujo de calor entre el interior y el exterior, de forma que se emplean para calefacción en invierno y para refrigeración en verano. Es decir, en invierno, transfiere el calor del exterior impulsándolo al interior y en verano transfiere el calor del interior expulsándolo al exterior.

A continuación, se explican las etapas del proceso termodinámico:

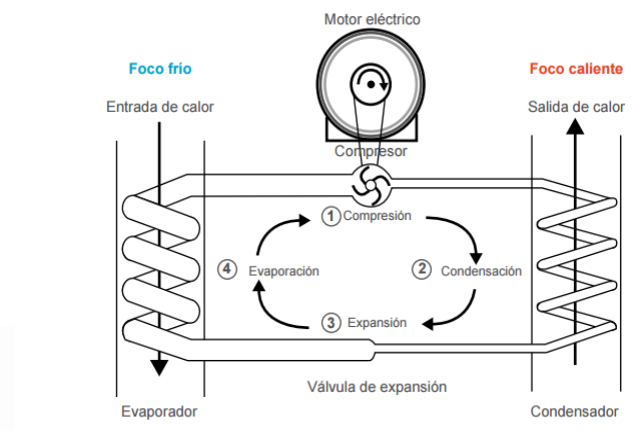


Figura 32: Esquema de funcionamiento de una bomba de calor accionada mecánicamente. Fuente: Parque de bombas de calor en España. IDAE

1. Compresión: mediante un consumo de energía eléctrica, el compresor comprime el fluido refrigerante, que eleva su presión y temperatura aumentando la entalpía, que es la cantidad de energía que puede intercambiar con su entorno.



2. Condensación: en el condensador, que es un intercambiador de calor, el fluido cede su calor al llamado foco caliente y al enfriarse se produce la condensación del fluido refrigerante, que pasa de estado gaseoso a estado líquido.

3. Expansión: a continuación, se hace pasar el fluido, todavía a presión, por una válvula de expansión, que genera una gran pérdida de carga por lo que se produce una reducción de presión isoentálpica del fluido desde la presión de condensación hasta la presión de entrada en el evaporador, reduciéndose por lo tanto la temperatura del fluido.

4. Evaporación: finalmente, el fluido pasa por otro intercambiador, situado en el foco frío, y llamado evaporador en el que se produce un cambio de fase donde el refrigerante se evapora absorbiendo calor de nuevo, para volver a reiniciar el ciclo en el compresor.

Tipos de bombas de calor

En función de la fuente de la cual se extrae el calor, existen tres tipos de bombas de calor:

- Aerotérmica: Emplean el calor del aire ambiente, es la que emplearemos para el análisis.
- Geotérmica: Aprovecha el calor contenido bajo la superficie terrestre. Requiere de una instalación más compleja.
- Hidrotérmica: este tipo de bombas, transfieren calor desde una corriente de agua superficial, a la que deben de tener acceso.

Según los fluidos entre los que se realice el intercambio de calor, las bombas pueden ser de varios tipos también, el primer fluido hace referencia a la fuente de la que se extrae el calor, agua, aire o tierra; mientras que el segundo, que es el que se emplea para climatizar, puede ser agua o aire.



En el caso de estudio se empleará una bomba aire-agua. Entre las ventajas, está el hecho de que se puede aprovechar una instalación de radiadores convencionales, ya existente en la vivienda. Además, presenta otras ventajas como el bajo volumen de ruido en comparación con las de aire.

- Bomba de calor aire-aire.
- Bomba de calor aire-agua.
- Bomba de calor agua-aire.
- Bomba de calor agua-agua.
- Bomba de calor tierra-aire.
- Bomba de calor tierra-agua.

Por último, según su configuración, las bombas de calor pueden ser de dos tipos:

- Split o sistema partido, como el que se va a emplear. Se compone de dos unidades. Una se instala en el exterior y la otra unidad en el interior de la casa. La parte exterior suele tener la misma apariencia que un aire acondicionado y la interior suele tener el formato de una caldera. Ambas unidades están conectadas por líneas frigoríficas, por las que circula gas refrigerante. La unidad exterior se encarga de comprimir el gas y enviarlo hasta la unidad interior donde se intercambiará el calor con el circuito de agua de la calefacción y ACS. La unidad interior incorpora la mayoría de los elementos como la bomba de circulación, vaso de expansión, manómetro, llave de llenado...
- Sistema compacto: las unidades compactas incorporan el evaporador y condensador en una única máquina, situada en el exterior. Desde la máquina hasta el sistema de calefacción, normalmente unidos por un depósito de inercia intermedio, circula agua. es decir, el gas solo se encuentra en la máquina exterior. Esto nos permite ahorrarnos las tuberías y la correspondiente mano de obra. Si alejamos mucho la unidad, puede haber problemas de pérdida de carga con el agua o aire en el sistema, que puede solucionarse con purgadores y un buen dimensionado de la bomba de circulación. En zonas especialmente frías hay que mezclar con anticongelante el circuito de agua.



Eficiencia energética

Los principales parámetros que caracterizan la eficiencia energética de una bomba de calor vienen detallados a continuación.

A plena carga, los rendimientos de la bomba de calor, tanto en modo calefacción como en modo refrigeración, vienen determinados por el COP y el EER.

- COP: (Coefficient of Performance) Coeficiente de eficiencia energética en modo calefacción:

$$COP = \frac{\text{Potencia de calefacción para unas condiciones específicas de temperatura con la unidad a plena carga}}{\text{Potencia eléctrica absorbida de la red}}$$

Ecuación 13: COP de una bomba de calor

- EER: (Energy Efficiency Ratio) Factor de eficiencia energética en modo refrigeración

$$EER = \frac{\text{Potencia de refrigeración para unas condiciones específicas de temperatura con la unidad a plena carga}}{\text{Potencia eléctrica absorbida de la red}}$$

Ecuación 14: EER de una bomba de calor

Sin embargo, la máquina no funciona la mayoría de las veces a plena carga, por lo que, a la hora de determinar la eficiencia del equipo, no siempre son fiables; por ello con la aplicación del Reglamento Delegado 626/2011, a partir del 01/01/13 las bombas de calor deben venir etiquetadas con su factor de eficiencia energética estacional, SEER, y su coeficiente de rendimiento estacional SCOP. De manera genérica se denominan SPF (Seasonal Performance Factor) [5].



Realmente, los valores de fabricante de estos parámetros se obtienen a partir de la energía consumida y ponderada para diferentes niveles de carga, el número de horas de servicio al año y la zona climática, el consumo de energía en standby y en modo desactivado por termostato, como viene detallado en el documento publicado por MINETAD [5].

Para el caso de estudio, se mostrará el valor medio obtenido con los datos empleados a lo largo del año.

- SCOP: Coeficiente de rendimiento estacional en modo calefacción:

$$SCOP = \frac{\text{Demanda de calefacción anual}}{\text{Consumo de electricidad anual en modo calefacción}}$$

Ecuación 15: Cálculo de SCOP

- SEER: Factor de eficiencia energética estacional:

$$SEER = \frac{\text{Demanda de refrigeración anual}}{\text{Consumo de electricidad anual en modo refrigeración}}$$

Ecuación 16: Cálculo de SEER

Tradicionalmente, la Calificación Energética de las bombas de calor se realizaba de acuerdo a la *Figura 33*, en función del COP y del EER.

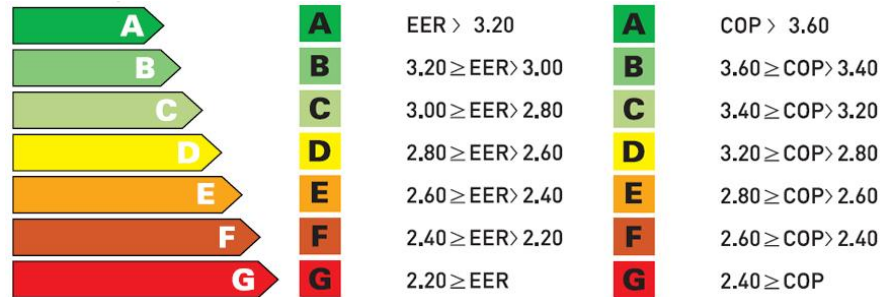


Figura 33: Calificación energética de bombas de calor. Fuente: Snowmenkima

Sin embargo, como se acaba de explicar, es más representativo el empleo de los valores medios estacionales, y es lo exigido hoy en día por la Directiva 2010/30/UE [5].



Class	SEER Range	SCOP Range
A+++	$SEER \geq 8,50$	$SCOP \geq 5,10$
A++	$6,10 \leq SEER < 8,50$	$4,60 \leq SCOP < 5,10$
A+	$5,60 \leq SEER < 6,10$	$4,00 \leq SCOP < 4,60$
A	$5,10 \leq SEER < 5,60$	$3,40 \leq SCOP < 4,00$
B	$4,60 \leq SEER < 5,10$	$3,10 \leq SCOP < 3,40$
C	$4,10 \leq SEER < 4,60$	$2,80 \leq SCOP < 3,10$
D	$3,60 \leq SEER < 4,10$	$2,50 \leq SCOP < 2,80$
E	$3,10 \leq SEER < 3,60$	$2,20 \leq SCOP < 2,50$
F	$2,60 \leq SEER < 3,10$	$1,90 \leq SCOP < 2,20$
G	$SEER < 2,60$	$SCOP < 1,90$

Figura 34: Calificación energética basada en parámetros estacionales de una bomba de calor. Fuente: Atecal

Marco Europeo

Como se ha expuesto en la introducción, el papel de la bomba de calor en el los Objetivos de Clima y Energía de la UE, es muy importante.



El informe de Eurobserv'ER, "Heat Barometer" [7], lleva a cabo un análisis del mercado de bombas de calor en el panorama europeo. Constata que de 2014 a 2015, el número de bombas de calor creció en un 20% hasta alcanzar 29,5 millones unidades de bombas de calor en funcionamiento en la UE, además este crecimiento es principalmente debido a las bombas de calor aire-agua, que proporcionan también ACS, como la seleccionada para este proyecto, frente a las que emplean calor geotérmico [8].

De acuerdo con European Heat Pump Association [8], a día de hoy las bombas de calor contribuyen a una reducción de 9,18 millones de emisiones de toneladas de CO₂ en la UE, además podrían reducir las emisiones de CO₂ del sector residencial en un 50%.

La *Figura 35* muestra un mapa de la Unión Europea con el número de bombas de calor por país, en azul las aerotérmicas y en naranja las geotérmicas. Países como España, Italia o Portugal de acuerdo con el informe, no son directamente comparables con el resto debido a la fuerte presencia de bombas de calor para refrigeración exclusivamente (posteriormente se verá la situación de España). Se observa, sin embargo, la gran diferencia existente entre España e Italia, con climas muy parecidos.

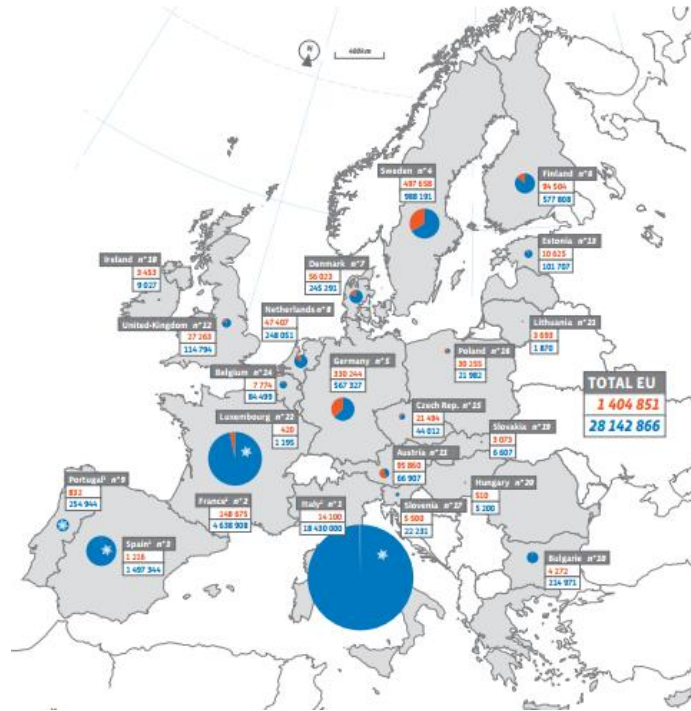


Figura 35: Parque de bombas aerotérmicas y geotérmicas instaladas en Europa en 2015, en unidades. Fuente: Eurobserv'ER

La energía captada desde el medio exterior por las bombas de calor se considera renovable, y, por tanto, computa como tal a los efectos de cumplimiento de los objetivos de Energía y Clima de la UE. La cantidad de energía renovable procedente de la aerotermia, E_{res} , se calcula de acuerdo con el Anexo VII de la Directiva Europea 2009/28/EC y la Decisión de la Comisión 2013/114/EU

$$E_{res} = Q_{usable} * \left(1 - \frac{1}{SPF}\right)$$

Ecuación 17: Energía renovable procedente de la aerotermia

Donde:

Q_{usable} , es el calor total proporcionado por la bomba



$\eta = 0,466$, ratio entre la producción total de energía eléctrica y el consumo de energía primaria empleada para dicha producción de electricidad, calculada como media de la UE, según Eurostat

Esa condición renovable aplicará siempre y cuando:

$$SPF > 1,15 * \frac{1}{\eta} = 2,47$$

Siendo SPF el Factor de Rendimiento Medio Estacional

Marco Nacional

El Estudio realizado por el IDAE entre los meses de julio y diciembre de 2014 sobre el Parque de Bombas de Calor en España [9], concluyó que el 34% del total de hogares y establecimientos en España, cuenta con una bomba de calor. El parque total asciende a 11.971.823 unidades de bombas. Mayoritariamente, se encuentran en la Zona Mediterránea (5.746.932 unidades), seguida de la Continental (1.428.261 unidades).

La energía aerotérmica utilizada como fuente de calor en bombas de calor reversible es la predominante dentro de este parque de bombas de calor. La mayor concentración de unidades se localiza en los hogares, siendo de un 86%, (64% en la zona Continental).

Del parque total, un 5% se usan solamente para refrigerar, mientras que las restantes son utilizadas para satisfacer necesidades de calefacción y refrigeración.

En cuanto a la potencia de las bombas de calor, se muestran a continuación dos histogramas que recogen los rangos de potencia con mayor número de



unidades tanto por zona climática como por uso. Se observa que predominan las bombas de potencias entre 2,5 y 5kW.

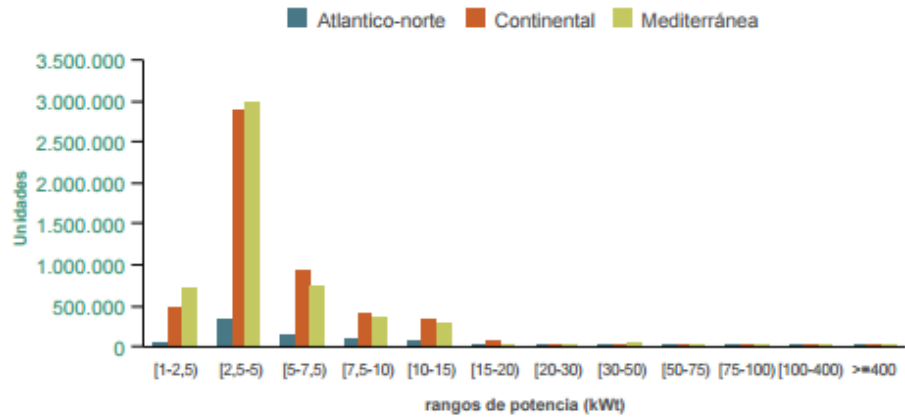


Figura 36: Parque de bombas de calor en España según rangos de potencia y zona climática. Fuente: IDAE

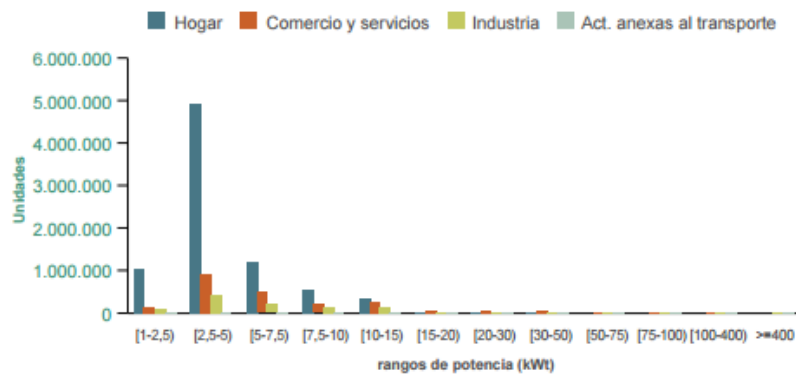


Figura 37: Parque de bombas de calor por sectores según rangos de potencia. Fuente: IDAE

Selección de una bomba de calor



Para el caso de estudio se ha seleccionado una Bomba de Calor aire-agua mediante aerotermia¹⁶, de la cual se dispone en su hoja de características de las curvas explícitas de COP, EER y potencia térmica cedida exactas en función de la temperatura, lo cual permitirá llevar a cabo un análisis horario en función de la temperatura exterior. Además, dispone de las tres funciones requeridas, calefacción, refrigeración y ACS.

Las principales características de la bomba se enumeran a continuación:

- Bomba de Calor Aire-Agua tipo “split”
- Diferentes modos de funcionamiento de calefacción, refrigeración y producción de ACS mediante accionamiento de una válvula de tres vías (incorporada)
- Compresor con tecnología inverter, con válvula de expansión electrónica y ventilador de velocidad variables

Es importante entender la siguiente distinción, existen equipos con tecnología inverter, lo cual permite regular la potencia a la que trabaja la máquina de forma que trabaje de modo constante durante todo el periodo a la carga requerida. Los equipos que no poseen esta tecnología no son regulables, en este caso lo que ocurriría es que trabajarían a potencia máxima durante el periodo de tiempo necesario para suministrar la energía que se precisa, es decir, hasta lograr la temperatura deseada, y luego se apagarían. A efectos de energía, esencialmente, ambos deben de suministrar la misma, sin embargo, la potencia requerida por la tecnología no inverter sería superior.

La *Figura 38* muestra un esquema de los tres modos de funcionamiento de la bomba.

¹⁶ Se trata del modelo AQUA 3 de Ferroli

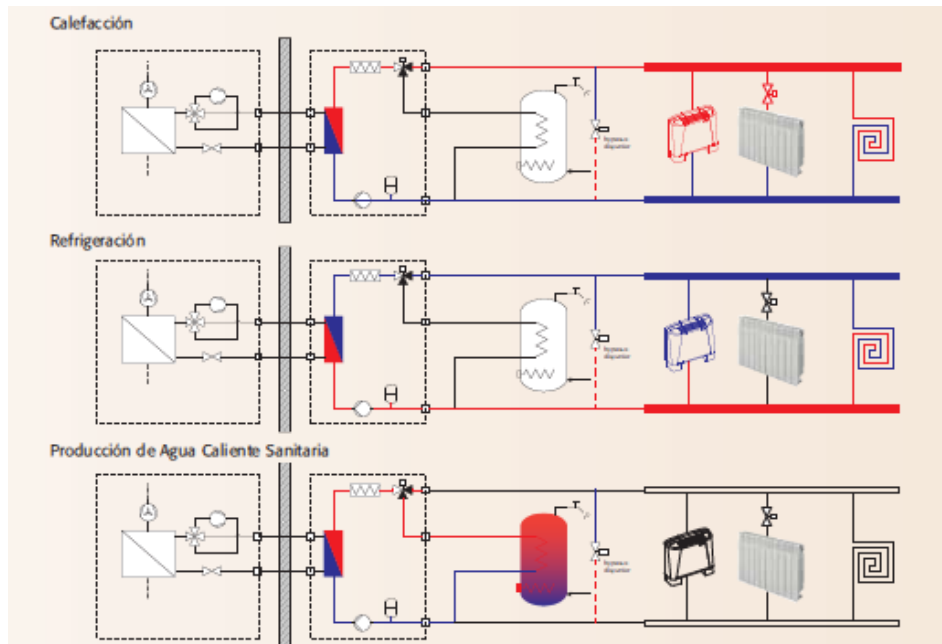


Figura 38: Esquemas de principio bomba AQUA 3. Fuente: Ferrolí

Prestaciones

Prestaciones nominales según condiciones de trabajo

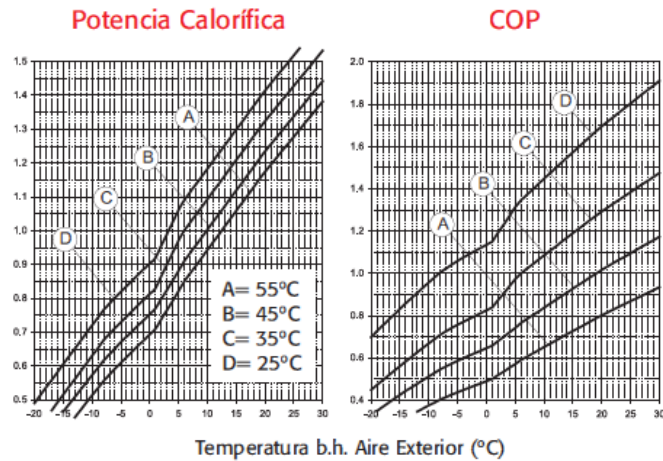
Cond.	Versión Base		8,1	10,1	12,1	14,1	16,1
ATW5	Potencia térmica	kW	8,54	10,0	12,1	14,2	15,7
	Potencia absorbida	kW	2,04	2,47	2,89	3,47	3,99
	COP	-	4,19	4,05	4,19	4,09	3,93
	Caudal de agua	l/h	1472	1723	2095	2441	2701
	Pérdida de carga	kPa	40	29	50	41	33
AS3WB	Potencia frigorífica	kW	9,10	10,6	12,9	15,0	16,6
	Potencia absorbida	kW	2,48	3,01	3,53	4,22	4,85
	COP	-	3,67	3,52	3,65	3,55	3,42
	Caudal de agua	l/h	1576	1845	2242	2604	2880
	Pérdida de carga	kPa	36	24	47	36	28

Prestaciones nominales según condiciones de trabajo

Cond.	Versión Base		8,1	10,1	12,1	14,1	16,1
ATW45	Potencia térmica	kW	7,77	9,09	11,0	12,9	14,3
	Potencia absorbida	kW	2,41	2,91	3,42	4,10	4,71
	COP	-	3,22	3,12	3,22	3,15	3,04
	Caudal de agua	l/h	1346	1573	1912	2225	2469
	Pérdida de carga	kPa	44	36	55	47	40
AS3W7	Potencia frigorífica	kW	6,70	7,83	9,54	11,1	12,3
	Potencia absorbida	kW	2,34	2,83	3,33	3,97	4,57
	COP	-	2,86	2,77	2,86	2,80	2,69
	Caudal de agua	l/h	1153	1349	1640	1905	2111
	Pérdida de carga	kPa	52	45	62	55	50

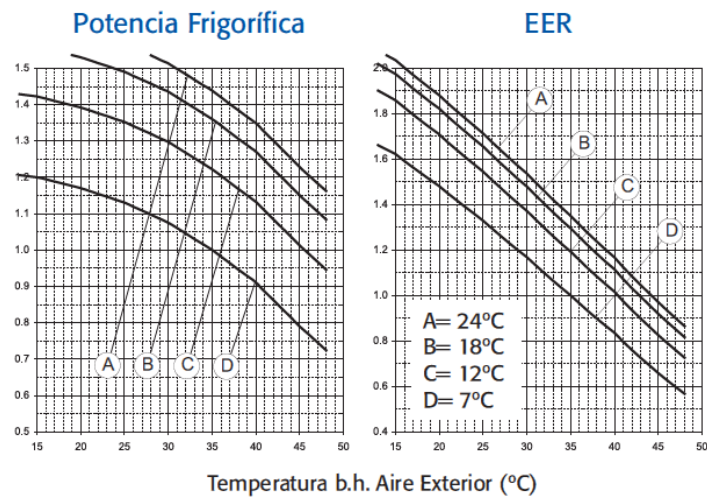
Tabla 21: Prestaciones nominales según condiciones de trabajo. Fuente: Ferrolí.

Partiendo de las gráficas¹⁷ que aparecen en el Tríptico del Fabricante, se han reproducido mediante toma de puntos e interpolación con el fin de obtener números exactos que poder introducir en el modelo para realizar los cálculos.



Coeficientes a aplicar sobre las prestaciones A7W35

Figura 39: Prestaciones bomba de calor AQUA3 en modo calor. Fuente: Ferrolí



Coeficientes a aplicar sobre las prestaciones A35W7

Figura 40: Prestaciones bomba de calor AQUA3 en modo frío. Fuente: Ferrolí

¹⁷ Las gráficas de las Figuras 39 y 40 están en términos relativos respecto de los valores nominales que se muestran en la Tabla 21



Así mismo, se muestran los límites operativos de la bomba, como se puede comprobar comparando con las condiciones climáticas que se han descrito en el apartado de Caracterización de la zona climática de referencia, las temperaturas de la zona D3, permanecen siempre entre los límites. En efecto, de acuerdo con la curva estándar de datos horarios para la zona climática D3 de la AEMET, las temperaturas oscilan entre $-0,6^{\circ}\text{C}$ y $36,0^{\circ}\text{C}$.

	Refrigeración		Calefacción	
	min	máx.	min	máx.
T° Aire Exterior ($^{\circ}\text{C}$)	10	48	-20	45
T° salida de agua ($^{\circ}\text{C}$)	7	25	25	55

Tabla 22: Límites operativos bomba de calor. Fuente: Ferroli

Metodología empleada

Una vez que se han definido las necesidades térmicas a nivel horario de la vivienda para calefacción, ACS y refrigeración, el sistema aerotérmico deberá aportar la energía necesaria para cubrir dichas necesidades. Ahora bien, este sistema, a diferencia de las calderas de gasóleo y gas natural, presenta un rendimiento o eficiencia energética, (medido por COP y ERR) que varía horariamente en función de la temperatura exterior. Por ello, para cada hora, y en función de dicha temperatura, lo primero que se ha hecho, es calcular el COP o el ERR que proporciona la máquina para determinar el consumo de energía que precisa exterior (consumo de energía eléctrica de la red) y la energía que se aporta desde el medio para cubrir la necesidad de energía. Es decir, se estaría hablando de $\text{COP}_i = f(T_{\text{ext } i}^{\circ}\text{C})$ y $\text{EER}_i = g(T_{\text{ext } i}^{\circ}\text{C})$.



Además, la potencia térmica nominal que la máquina es capaz de entregar, también varía ligeramente con la temperatura exterior, es decir $P_{\text{térmica}_i} (T_{\text{ext}}^{\circ\text{C}})$.

Partiendo de la demanda térmica para cada hora, a una determinada temperatura exterior para cada hora i^{18} , $D_i (T_{\text{ext}}^{\circ\text{C}})$, se obtiene, por un lado, como se acaba de explicar, en el caso del funcionamiento en modo calor un valor de $\text{COP}_i (T_{\text{ext}}^{\circ\text{C}})$, y un valor para el funcionamiento en modo frío $\text{EER}_i (T_{\text{ext}}^{\circ\text{C}})$, y por otro lado, el valor máximo de la potencia térmica que puede suministrar la máquina a dicha $T_{\text{ext}_i}^{\circ\text{C}}$, $P_{\text{térmica}_i} (T_{\text{ext}}^{\circ\text{C}})$.

Este valor $P_{\text{térmica}_i} (T_{\text{ext}}^{\circ\text{C}})$, lo compararemos con la energía térmica demandada $D_i (T_{\text{ext}}^{\circ\text{C}})$, y, si la demanda es inferior a la energía que suministraría la máquina funcionando la hora completa a plena carga, si se trata de una máquina equipada con tecnología inverter, funcionará a un nivel de potencia menor que el máximo y si no, se apagará y encenderá a intervalos para no sobrepasar los requerimientos energéticos, funcionando siempre a potencia máxima. Gracias a la tecnología inverter de la bomba de calor que se emplea, asumiremos que el nivel de carga al que funciona la máquina es $\frac{D_i (T_{\text{ext}}^{\circ\text{C}})}{P_{\text{térmica}_i} (T_{\text{ext}}^{\circ\text{C}})}$.

A partir de aquí, se obtiene la Potencia suministrada por la red a plena carga para una temperatura exterior determinada, $P_{\text{sum}_i} (T_{\text{ext}}^{\circ\text{C}})$

$$P_{\text{sum}_i} (T_{\text{ext}}^{\circ\text{C}}) = \frac{P_{\text{térmica}_i} (T_{\text{ext}}^{\circ\text{C}})}{\text{COP}_i (T_{\text{ext}}^{\circ\text{C}})}$$

$$P_{\text{sum}_i} (T_{\text{ext}}^{\circ\text{C}}) = \frac{P_{\text{térmica}_i} (T_{\text{ext}}^{\circ\text{C}})}{\text{EER}_i (T_{\text{ext}}^{\circ\text{C}})}$$

¹⁸ Según se indica, se puede asumir $T^{\circ\text{C}}$ en b.h = Temperatura seca-1 $^{\circ\text{C}}$, que es lo que se ha empleado para el análisis



Multiplicando por el coeficiente que determina el nivel de carga $\frac{D_i(\text{Text}^{\circ}\text{C})}{P_{\text{termicai}}(\text{Text}^{\circ}\text{C})}$, se obtiene la energía consumida de la red en cada hora $E_{\text{redi}}(\text{Text}^{\circ}\text{C})$, que se empleará para el cálculo de los costes de consumos:

$$E_{\text{redi}}(\text{Text}^{\circ}\text{C}) = P_{\text{sumi}}(\text{Text}^{\circ}\text{C}) * \frac{D_i(\text{Text}^{\circ}\text{C})}{P_{\text{termicai}}(\text{Text}^{\circ}\text{C})}$$

Como se puede observar, en las gráficas anteriores, aparecen las curvas de tres temperaturas de agua caliente:

- 55 °C
- 45°C
- 35°C

Y de cuatro de agua fría, de los cuales sólo se han reproducido los dos primeros:

- 7°C
- 12°C
- 18°C
- 24°C

Se ha escogido 45°C como temperatura de agua caliente,¹⁹ y 7°C para la fría.

A continuación, se recogen los valores absolutos de la máquina empleada. Se ha comprobado que el tamaño de bomba de calor empleado es suficiente para satisfacer completamente la demanda térmica obtenida a partir de las temperaturas horarias estandarizadas.

¹⁹ Con una temperatura de agua caliente de 45°C, se pueden emplear emisores convencionales ya existentes en la vivienda, mientras que los 35°C se emplean junto con emisores de baja temperatura.

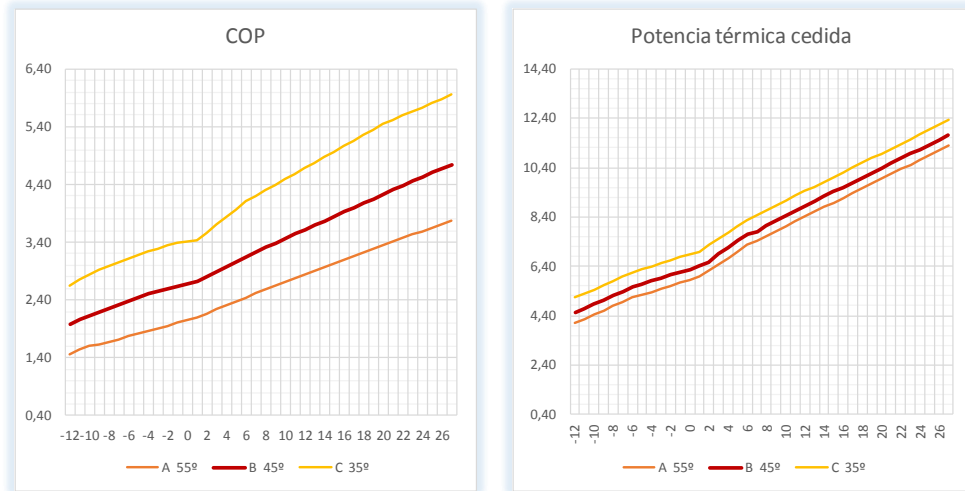


Figura 41: Prestaciones bomba de calor empleada en modo calor $COP_i(T_{ext}^{\circ}C)$ y $P_{termica_i}(T_{ext}^{\circ}C)$. Fuente: Elaboración Propia a partir de las prestaciones indicadas por fabricantes de sistemas aerotérmicos.

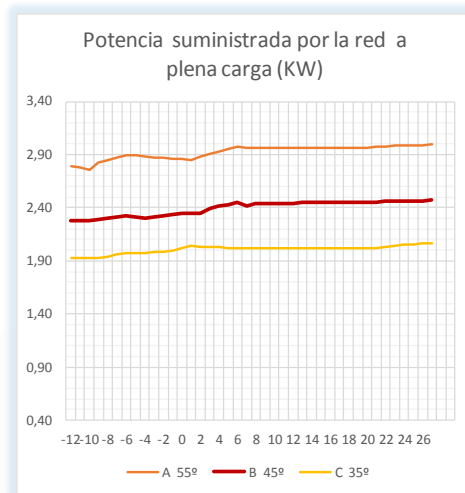


Figura 42: Potencia suministrada por la red a plena carga $P_{sum_i}(T_{ext}^{\circ}C)$. Fuente: Elaboración propia.

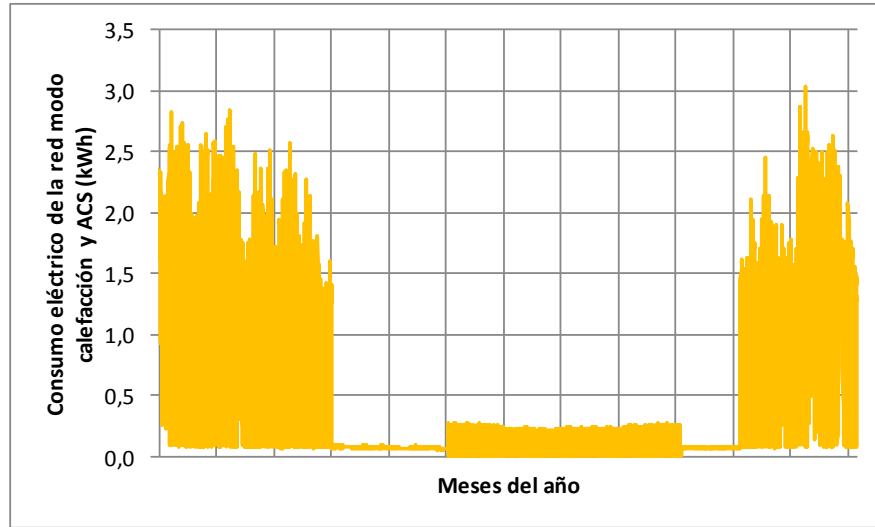


Figura 43: Consumo de la red en modo calefacción y ACS a lo largo del año, $E_{red,i}(Text^{\circ}C)$.

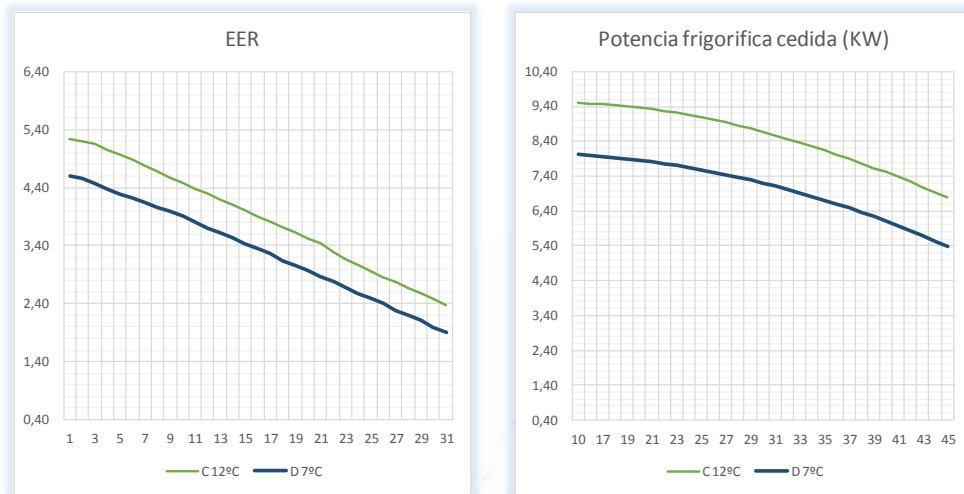


Figura 44: Prestaciones bomba de calor empleada en modo frío $EER_i(Text^{\circ}C)$ y $P_{termica,i}(Text^{\circ}C)$. Fuente: Elaboración Propia a partir de las prestaciones indicadas por fabricantes se sistemas aerotérmicos.



Figura 45: Potencia térmica en modo frío consumida de la red a plena carga, $P_{sum_i}(Text^{\circ}C)$. Fuente: Elaboración propia

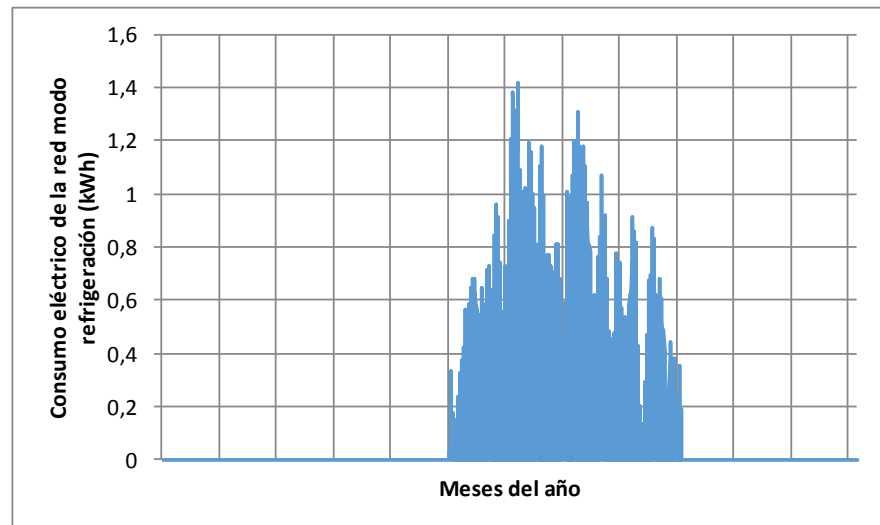


Figura 46: Consumo de la red en modo refrigeración a lo largo del año, $E_{red_i}(Text^{\circ}C)$.

Integrando los resultados a lo largo de las 8.760 h del año se obtienen los resultados que se sintetizan en la *Tabla 23*.



	Demanda térmica	Consumo de la red	Rendimiento estacional
Calefacción	13.048 kWh	4.981 kWh	3,09
ACS	2.327 kWh		
Refrigeración	2.474 kWh	678 kWh	3,65
TOTAL	17.849 kWh	5.659kWh	3,15

Tabla 23: Resumen consumos aerotermia. Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, se observa una de las ventajas de la climatización con bomba de calor: la posibilidad de disponer de una energía equivalente a 17.849 kWh con un consumo de energía eléctrica de 5.659 kWh. De esta forma, se logra una energía del medio (renovable) de 12.190 kWh, es decir con un rendimiento medio anual incluyendo modo caliente y frío del 315%.

3.1.2 CALDERA DE GAS NATURAL PARA CALEFACCIÓN Y PRODUCCIÓN DE ACS Y AIRE ACONDICIONADO PARA REFRIGERACIÓN

En el supuesto que la vivienda objeto de estudio cubriese sus necesidades de calefacción y ACS mediante una caldera condensación de gas natural, hay que tener en cuenta las limitaciones que introduce la Directiva Europea de Ecodiseño, que introduce el concepto de rendimiento medio estacional para este tipo de calderas también. Previamente se utilizaba el concepto de rendimiento instantáneo sobre PCI de la caldera de condensación y era frecuente indicar rendimientos por encima del 100%. Con los criterios de rendimiento medio y medición sobre PCS (que ya incluye el calor latente de los gases de combustión), la Directiva exige un rendimiento mínimo de las calderas de gas natural de menos de 25 kW del 86%.



(Este mismo criterio de la Directiva se usará a continuación para la caldera de gasóleo). Con ese criterio, el consumo de gas natural sería:

$$\text{Consumo gas natural} = \frac{(13.048 \text{ kWh} + 2.327 \text{ kWh})}{0,86} = 17.878 \text{ kWh}_g/\text{año}$$

3.1.3 CALDERA DE GASÓLEO PARA CALEFACCIÓN Y PRODUCCIÓN DE ACS Y AIRE ACONDICIONADO PARA REFRIGERACIÓN

En este caso la cobertura de las necesidades de calor para calefacción y ACS se proporcionan mediante una caldera de gasóleo con un rendimiento medio anual del 86% que debería proporcionar un calor útil equivalente de 13.048 kWh para calefacción y 2.327 kWh para ACS. Con una equivalencia de 10,18 kWh/l, el consumo estimado anual de gasóleo ascendería a:

$$\text{Consumo gasóleo} = \frac{(13.048 \text{ kWh} + 2.327 \text{ kWh})}{0,86} * \frac{1 \text{ l}}{10,18 \text{ kWh}} = 1.756 \text{ l/año}$$



3.2 COSTES DE OPERACIÓN DE LAS TRES ALTERNATIVAS

3.2.1 COSTE DE LA CLIMATIZACIÓN MEDIANTE AEROTERMIA

Coste de la energía

Una vez obtenido el consumo eléctrico horario de la red necesario para satisfacer las necesidades de calefacción, refrigeración y ACS se ha estimado el coste anual de ese consumo en dos supuestos:

- Que el consumidor se acogiese a la tarifa PVPC 2.0, sin discriminación horaria
- Que el consumidor se acogiese a la tarifa PVPC 2.0 DHA, con discriminación horaria de dos períodos

El coste anual del término variable (consumo de energía eléctrica) del sistema de aerotermia con cada una de las tarifas es simplemente el precio del término horario (Pr_i) de la tarifa correspondiente multiplicado por el consumo de electricidad:

Coste anual término variable

$$= \sum_{i=1}^{87600} (Pr_i * \text{Energía horaria consumida } i)$$

A pesar de que solo se dispone del conjunto de consumos horarios de electricidad para un año “estándar” (que es el resultado de la climatología estándar que define la normativa española para cada zona climática), con el fin de proporcionar mayor robustez a los resultados, se ha valorado el coste para tres periodos anuales disponibles en que existen los PVPC (desde 1 de abril 2014 a 31 de marzo de 2017). Los resultados obtenidos son los siguientes:



Periodo considerado	2.0	2.0 DHA	2.0 DHS
Abril 2014-Marzo 2015	669 €	521 €	537€
Abril 2015-Marzo 2016	613 €	479 €	494 €
Abril 2016-Marzo 2017	687 €	554 €	569 €
Coste medio anual	656 €	518 €	533 €

Tabla 24: Término de energía anual del consumo del sistema de aerotermia (antes de IE e IVA) para las distintas tarifas de PVPC. Fuente: Elaboración Propia

Puede observarse que la tarifa más ventajosa en este caso sería la de discriminación horaria con dos periodos, lo cual es lógico, porque una parte importante del consumo se produce en horas nocturnas y de madrugada, que es cuando el precio valle de la energía de la tarifa de discriminación horaria es más ventajoso. Por tanto se continúa el análisis con el supuesto de que en el caso de aerotermia la vivienda se acoge a la tarifa PVPC 2.0 DHA, con discriminación horaria de dos períodos.

Coste del término fijo o de potencia

Del análisis de los datos de consumo para climatización se ha observado que la potencia máxima que precisa el sistema aerotérmico es de unos 3,04 kW, con lo que se estima que el titular de la vivienda deberá incrementar su potencia contratada en una cuantía de 3,3 kW (pasando del escalón que tenía antes de implantar el sistema de 5,5 kW (220V), como se ha descrito en el apartado de Consumos eléctricos convencionales de la vivienda, a 8,8 kW).

Por tanto el coste del término de potencia “imputable al sistema de climatización” será de:



$$41,16 \frac{\text{€}}{\text{kWh-año}^{20}} * 3,3 \text{ kW} = 136\text{€/año (antes de impuestos)}$$

En definitiva, los costes totales del sistema de climatización de aerotermia ascenderían a la suma de los costes del término fijo debido al incremento de potencia contratada y el término de energía consumida:

Coste anual de climatización con aerotermia

$$\begin{aligned} \text{Coste anual de climatización con aerotermia} &= CF + CV = 136 + 518 \\ &= 654\text{€/año} \end{aligned}$$

E incluyendo el Impuesto sobre la electricidad y el IVA

Coste aerotermia con impuestos:

$$= 654 * (1 + 5,11269632\%) * (1 + 21\%) = 832\text{€/año}$$

3.2.2 COSTE DEL SUMINISTRO MEDIANTE CALDERA DE GAS NATURAL Y AIRE ACONDICIONADO

En este caso la cobertura de las necesidades de calor para calefacción y ACS se proporcionan mediante una caldera de gas natural que consumiría, como se ha indicado en el apartado anterior, 17.878 kWh_g/año.

Las necesidades para refrigeración se cubrirían mediante un equipo de aire acondicionado y para facilitar la comparación con el caso de aerotermia, se admite

²⁰ Importe del término fijo o de potencia de las tarifas de baja tensión de menos de 10 kW contratados



que el rendimiento del equipo, caracterizado por el SEER, es el mismo, así como el perfil de consumo, con lo que el consumo de electricidad, en kWh, para refrigeración es el mismo.

Sin embargo, en este caso, se supone que la vivienda se mantiene en la tarifa de PVPC 2.0 de un solo período, es decir, no se acoge al PVPC de dos periodos (tarifa 2.0. DHA) dado que la mayor parte del consumo de aire acondicionado se produce en horas del período punta y de usar esa tarifa 2.0 DHA, estaría haciéndolo en las horas con recargo.

Coste del gas natural para calefacción y ACS

Las tarifas reguladas de gas natural, denominadas de Último recurso (TUR), tienen una estructura binómica y son actualmente las que se recogen en la *Tabla 25*:

	Fijo (€/cliente-mes)	Variable (cent/kWh)
TUR 1. Consumo inferior o igual a 5.000 kWh/año	4,31	5,160230
TUR 2. Consumo superior a 5.000 kWh/año e inferior o igual a 50.000 kWh/año	8,45	4,472830

Tabla 25: Precios sin impuestos de la tarifa de último recurso de gas natural en vigor desde las cero horas de día 1 de abril de 2017. Fuente: BOE

Dado el consumo que existiría en nuestro caso (>5.000 kWh_g), la tarifa aplicable sería la TUR 2 y el coste anual sería el siguiente:



$$\text{Coste suministro gas natural} = 12 \text{ meses} * \frac{8,45\text{€}}{\text{mes}} +$$
$$0,04472830 \frac{\text{€}}{\text{kWh}_g} * 17.878 \text{ kWh}_g/\text{año} = 901\text{€/año}$$

(antes de impuestos)

Incrementando este importe con el coste de alquiler de contador, el impuesto de hidrocarburos y el IVA, resulta:

Coste gas natural

$$= \left(1,25 \frac{\text{€}}{\text{mes}} * 12 \text{ meses} + 901 + 17.878 \frac{\text{kWh}_g}{\text{año}} \right)$$
$$* 0,00234 \frac{\text{€}}{\text{kWh}_g} * 1,21$$
$$= 1.159 \frac{\text{€}}{\text{año}} \text{ para el suministro de calefacción y ACS}$$

Coste de la electricidad del aire acondicionado para refrigeración

Coste de la energía

A lo anterior hay que añadir el coste del suministro de energía para el aire acondicionado.

Como se ha indicado en el apartado anterior y en las mismas condiciones que en el caso de la aerotermia, el consumo eléctrico para satisfacer la demanda de refrigeración se calcula a partir de los consumos eléctricos horarios y el término de energía en este caso del PVPC 2.0, como se ha indicado ya.



Análisis y Costes de los Posibles Sistemas de Climatización

El perfil de consumos para refrigeración en las horas del período 1 de junio a 30 de septiembre se muestra en la Figura 47. El consumo eléctrico de refrigeración en el año de condiciones climáticas estándar asciende a 678 KWh para la temporada desde 1 de junio a 30 de septiembre, que proporcionan 2.474 kWh de refrigeración.

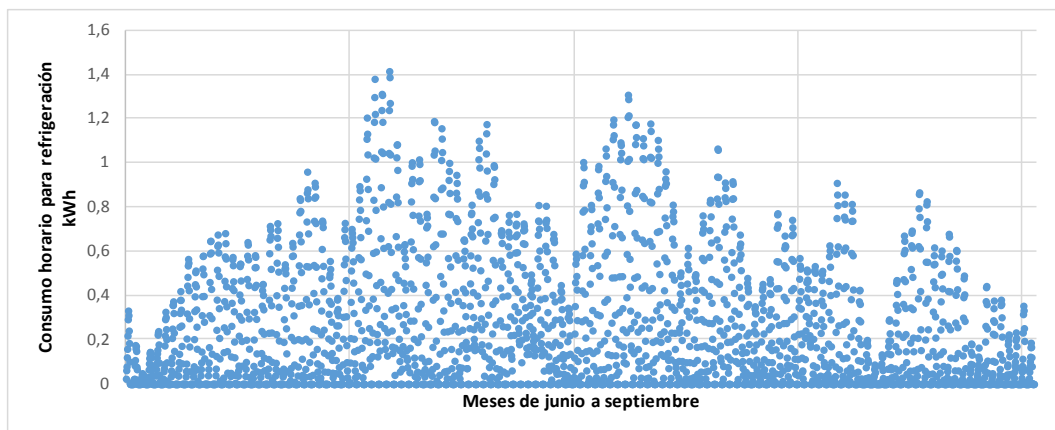


Figura 47: Consumo horario para refrigeración kWh. Fuente: Elaboración propia

Y el coste horario de la energía consumida con el perfil de precios hora a hora del término de energía de la tarifa PVPC 2.0 de junio a septiembre de 2014 sería el que se recoge en la Figura 48

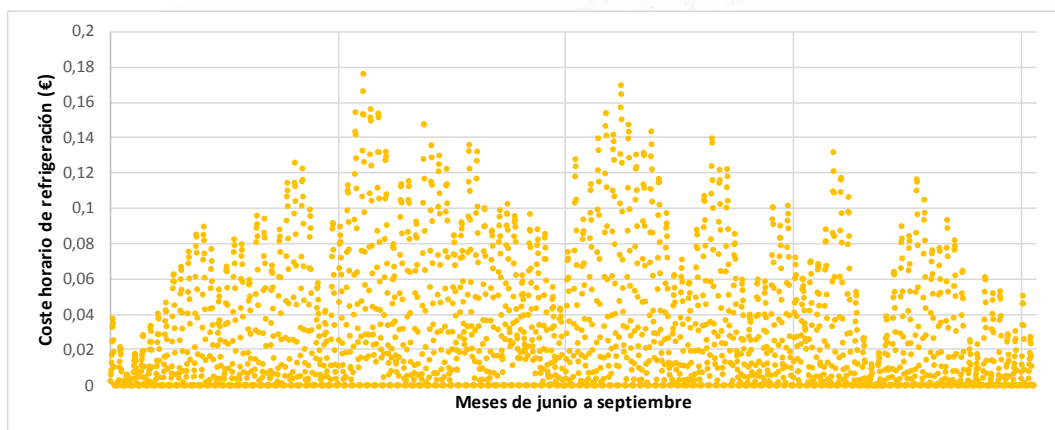


Figura 48: Consumo horario para refrigeración en €. Fuente: Elaboración propia



A pesar de que solo se dispone del conjunto de consumos horarios de electricidad para un año “estándar” (que es el resultado de la climatología estándar que define la normativa española para cada zona climática), con el fin de proporcionar mayor robustez a los resultados, se ha valorado el coste para tres periodos anuales de verano disponibles en que existen los PVPC (desde 1 de junio a 30 de septiembre de 2014, 2015 y 2016). El coste de la energía valorada a PVPC 2.0 figura en la *Tabla 26*.

Periodo considerado	Coste energía PVPC 2.0
Junio- septiembre 2014	83
Junio- septiembre 2015	88
Junio- septiembre 2016	70
Coste medio anual (€)	80

Tabla 26: Término de energía del consumo para refrigeración (antes de IE e IVA) para la tarifa de PVPC. 2.0

Coste del término fijo o de potencia

Del análisis de los datos de consumo para climatización se ha observado que la potencia máxima que precisa el sistema de aire acondicionado es 1,4 kW, con lo que se estima que el titular de la vivienda deberá incrementar su potencia contratada en esa una cuantía de 2,2 kW (pasando del escalón que tenía antes de implantar el sistema de 5,5 kW (220V) a 7,7 kW).

Por tanto el coste del término de potencia “imputable” al sistema de climatización en este caso será de:



$$41,16 \frac{\text{€}}{\text{kWh-año}^{21}} * 2,2 \text{ kW} = 91\text{€/año (antes de impuestos)}$$

Coste anual de climatización mediante aire acondicionado

En definitiva, los costes totales del sistema de refrigeración ascenderían a:

$$\text{Coste anual de refrigeración} = CF + CV = 91 + 80 = 171\text{€/año}$$

E incluyendo el Impuesto sobre la electricidad y el IVA

Coste refrigeración con impuestos

$$= 171 * (1 + 5,11269632\%) * (1 + 21\%) = 217\text{€/año}$$

Coste anual de los servicios de Calefacción y ACS con gas natural y Refrigeración con aire acondicionado

Sumando los costes de suministro anual de gas natural para calefacción y ACS y los costes del suministro de la temporada de electricidad para refrigeración se obtienen el coste total anual de esta alternativa de equipamiento que ascendería a:

Coste total suministro de gas natural para calefacción y ACS

$$+ \text{Coste de Refrigeración} = 1.159 + 217 = 1.376\text{€/año}$$

²¹ Importe del termino fijo o de potencia de las tarifas de baja tensión de menos de 10 kW contratados



3.2.3 COSTE DEL SUMINISTRO MEDIANTE CALDERA DE GASÓLEO Y AIRE ACONDICIONADO

Coste del gasóleo para calefacción y ACS

Como precio de referencia del gasóleo “C” de calefacción se ha tomado el promedio del periodo abril 2014-marzo 2017 que asciende a 0,6818 €/l y se ha incrementado en los costes de servicio de transporte a domicilio, estimado en 70 €/servicio de 1000 l, con lo que resulta un coste total en domicilio del cliente de 0,7518 €/l.

$$\text{Coste del suministro anual de gasoil} = 1.756l * \frac{0,7518\text{€}}{l} = 1.320 \text{ €/año}$$

Coste de la electricidad del aire acondicionado para refrigeración

Al igual que en el caso de la caldera de gas natural, las necesidades para refrigeración se cubrirían mediante un equipo de aire acondicionado y para facilitar la comparación con el caso de aerotermia, se admite que el rendimiento del equipo, caracterizado por el SEER, es el mismo, así como el perfil de consumo, con lo que el consumo de electricidad, en kWh, para refrigeración es el mismo.

Igualmente, se supone que la vivienda se mantiene en la tarifa de PVPC 2.0 de un solo período, es decir, no se acoge al PVPC de dos periodos (tarifa 2.0. DHA) dado que la mayor parte del consumo de aire acondicionado se produce en horas del período punta y de usar esa tarifa estaría haciéndolo en las horas con recargo.



Por tanto, sin necesidad de volver a incluir aquí los cálculos del coste del consumo eléctrico de refrigeración, se recoge simplemente el resultado de dichos costes:

Coste anual de climatización mediante aire acondicionado

$$\text{Coste anual de refrigeración} = CF + CV = 91 + 80 = 171\text{€/año}$$

E incluyendo el Impuesto sobre la electricidad y el IVA

Coste refrigeración con impuestos

$$= 171 * (1 + 5,11269632\%) * (1 + 21\%) = 217\text{€/año}$$

Coste anual de los servicios de calefacción y ACS con gasóleo y Refrigeración con aire acondicionado

Sumando los costes de suministro anual de gasóleo para calefacción y ACS y los costes del suministro de la temporada de electricidad para refrigeración se obtienen el coste total anual de esta alternativa de equipamiento que ascendería a:

Coste total suministro de gasoil para calefacción y ACS

$$+ \text{Coste de Refrigeración} = 1.320 + 217 = 1.537\text{€/año}$$

3.3 ANÁLISIS ECONÓMICO Y COMPARATIVA DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS

Para concluir con esta parte del estudio, se va a llevar a cabo un análisis económico de cada uno de los tres escenarios de equipamiento de climatización,



Análisis y Costes de los Posibles Sistemas de Climatización

para lo cual se va a considerar no únicamente el coste del consumo de combustibles y electricidad (coste de operación), sino también la inversión inicial en equipos (para los cuales se supondrá una vida útil de 15 años) y los costes de instalación y puesta en marcha, así como los costes de mantenimiento anuales.

Los costes considerados se recogen en la *Tabla 27* y la *Tabla 28*.

Coste de los equipos (€)	Sistema de aerotermia	Caldera de gas + Aire Acondicionado	Caldera de Gasóleo + Aire Acondicionado
Calefacción y ACS	7.600	1.400	1.900
Aire acondicionado		3.250	3.250
Instalación y puesta en marcha	1.500	1.000	1.000
TOTAL	9.100	5.650	6.150

Tabla 27: Costes de inversión en equipos, instalación y puesta en marcha.

Fuente: Elaboración Propia

Costes anuales de operación (€/año)	Sistema de aerotermia	Caldera de gas + Aire Acondicionado	Caldera de Gasóleo + Aire Acondicionado
Coste combustibles fósiles	-	1.159	1.320
Coste electricidad	831	217	217
TOTAL Costes energía	831	1.376	1.537
Coste anual de mantenimiento	100	150	150
TOTAL Costes anuales operación	931	1.526	1.687

Tabla 28: Costes anuales de operación (€). Fuente: Elaboración Propia



3.3.1 VALOR ACTUAL NETO

Con el fin de comparar el coste económico de las tres opciones de equipamiento con distintos valores de Capex y Opex se ha recurrido en primer lugar a calcular el Valor Actual Neto de las tres alternativas, con una tasa de descuento central del 3% admitiendo que la vida útil de las tres alternativas es la misma: 15 años. Los flujos de caja actualizados al momento de puesta en marcha con la tasa de descuento indicada se recogen en la *Tabla 29*.

Valoración mediante Valor Actual Neto (en moneda constante)			
Tasa descuento	3,0%		
	Sistema de aerotermia	Caldera de gas + Aire Acondicionado	Caldera de Gasóleo + Aire Acondicionado
Inversión y Puesta en marcha	9.100	5.650	6.150
Año 1	931	1.526	1.687
Año 2	931	1.526	1.687
Año 3	931	1.526	1.687
Año 4	931	1.526	1.687
Año 5	931	1.526	1.687
Año 6	931	1.526	1.687
Año 7	931	1.526	1.687
Año 8	931	1.526	1.687
Año 9	931	1.526	1.687
Año 10	931	1.526	1.687
Año 11	931	1.526	1.687
Año 12	931	1.526	1.687
Año 13	931	1.526	1.687



Año 14	931	1.526	1.687
Año 15	931	1.526	1.687
Valor Actual Neto	19.628 €	23.173 €	25.528 €
Diferencias VAN respecto a aerotermia		+3.545 €	+5.900 €
En porcentaje %		+18%	+30%

Tabla 29: Valor Actual Neto con Tasa de descuento del 3% para las distintas alternativas de climatización

Es decir, **la alternativa de climatización con aerotermia, a pesar de requerir una mayor inversión inicial, a lo largo de la vida útil es un 18% más económica que la opción de climatizar con caldera de gas más aire acondicionado y un 30% más económica que la opción de climatizar con caldera de gasóleo más aire acondicionado. Los ahorros logrados a lo largo de 15 años supondrían en moneda actual unos 3.545 € y 5.900 € respectivamente**

En la *Figura 49* y la *Figura 50* se recoge el resultado del Análisis de sensibilidad del Valor Neto Actualizado al Tipo de descuento de los tres sistemas estudiados:

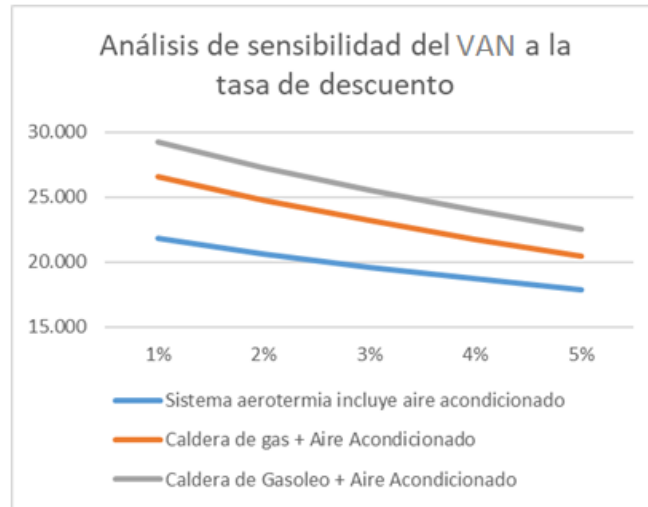


Figura 49: Análisis de sensibilidad del VAN a la tasa de descuento. Fuente: Elaboración Propia

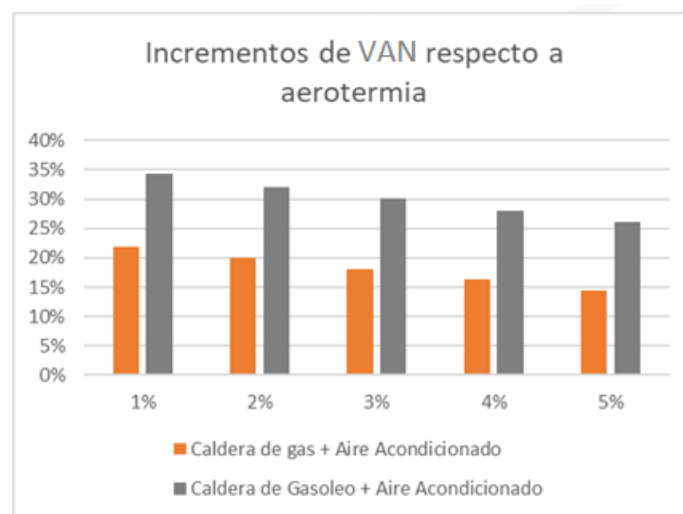


Figura 50: Incrementos de VAN respecto a aeroterminia en función de la tasa de descuento. Fuente: Elaboración Propia

Se observa que con las hipótesis que se han recogido a lo largo del análisis, la aeroterminia es un sistema de climatización ventajoso, que proporciona costes competitivos respecto a las tecnologías de climatización más usuales como son el gas natural y el gasóleo.



Frente al gas natural proporcionaría entre un 15 y un 22% de ahorro, según la tasa de descuento que se desee contemplar, que equivale a ahorros actualizados a origen entre 2.600 € y 4.750 € a lo largo de la vida útil de los equipos.

Frente al gasóleo la diferencia estaría entre un 26 y un 34%, según la tasa de descuento que se desee contemplar, que equivale a ahorros actualizados a origen entre 4.700 € y 7.500 € a lo largo de la vida útil.

3.3.2 LCOE

También resulta de interés determinar el LCOE, en este caso sería un Leveraged Cost of Final Energy de las tres alternativas, calculado como cociente entre el flujo actualizado a origen de los costes totales y el valor actualizado a origen de la energía final útil suministrada por las tres alternativas:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + O_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh final}} \right)$$

Donde:

I_t : Costes de inversión en el año t

M_t : Costes de mantenimiento en el año t

O_t : Costes de operación (combustible o energía primaria) en el año t

E_t : Energía útil producida en el año t

r : Tasa de descuento

Este indicador, LCOE, para una tasa de descuento del 3% presenta los siguientes valores:



	Sistema aerotermia	Caldera de gas + Aire Acondicionado	Caldera de Gasóleo + Aire Acondicionado
1%	0,089	0,108	0,119
2%	0,092	0,110	0,121
3%	0,095	0,112	0,123
4%	0,098	0,114	0,126
5%	0,101	0,116	0,128

Tabla 30: LCOE Leveraged Cost of Final Energy (€/kWh útil) de las tecnologías estudiadas. Fuente: Elaboración Propia

Se observa, que el coste por unidad de energía útil suministrada por el sistema aerotérmico es más reducido que en el resto de equipamientos.



Capítulo 4 ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE INCORPORAR UNA BATERÍA PARA ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Como análisis complementario en el caso de la vivienda dotada de climatización por aerotermia se ha estudiado el posible interés en dotar a la vivienda analizada de un sistema de almacenamiento eléctrico con batería para aprovechar en la medida de lo posible la diferencia de precios que proporciona la tarifa de acceso 2.0 DHA entre las horas valle y las horas punta. Se trata de un planteamiento que no es novedoso: actualmente existe un número importante de viviendas²² acogidas a este peaje de acceso como se pone de manifiesto en la *Tabla 31*

Peaje	Previsión MINETAD 2017 (A)			Previsión CNMC 2017 (B)			% variación (A) sobre (B)		
	Nº de clientes	Potencia facturada (MW)	Consumo (GWh)	Nº de clientes	Potencia facturada (MW)	Consumo (GWh)	Nº de clientes	Potencia facturada	Consumo
Baja Tensión	28.950.284	144.217	110.999	28.956.364	143.356	110.639	0,0%	0,6%	0,3%
Pc (I) ≤ 10 kW	27.392.979	112.608	67.033	27.395.918	112.432	66.871	0,0%	0,2%	0,2%
2.0 A	24.984.851	100.540	57.003	25.020.281	101.024	56.525	-0,2%	-0,5%	0,8%
2.0 DHA	2.423.965	12.044	9.994	2.371.306	11.387	10.307	2,2%	5,8%	-3,0%
2.0 DHS	4.363	24	36	4.332	21	40	0,7%	11,9%	-9,5%
10 kW < Pc ≤ 15 kW	819.399	10.133	8.609	821.146	10.249	8.473	-0,2%	-1,1%	1,6%
2.1 A	655.702	8.121	5.706	657.241	8.214	5.595	-0,2%	-1,1%	2,0%
2.1 DHA	163.040	2.005	2.894	163.248	2.027	2.868	-0,1%	-1,1%	0,9%
2.1 DHS	657	8	9	657	7	10	-0,1%	4,1%	-9,0%
Pc > 15 kW (3.0 A)	737.906	21.476	35.357	739.299	20.675	35.295	-0,2%	3,9%	0,2%
Media tensión	108.011	19.783	74.559	108.149	19.769	74.985	-0,1%	0,1%	-0,6%
3.1 A	87.494	6.208	15.582	87.598	6.191	15.657	-0,1%	0,3%	-0,5%
6.1 A	19.348	12.343	53.712	19.380	12.348	54.035	-0,2%	0,0%	-0,6%
6.1 B	1.169	1.233	5.265	1.171	1.230	5.293	-0,2%	0,2%	-0,5%
Alta tensión	2.678	9.273	52.730	2.676	9.203	52.607	0,1%	0,8%	0,2%
6.2	1.619	3.171	18.003	1.617	3.190	17.974	0,1%	-0,6%	0,2%
6.3	428	1.874	10.639	428	1.849	10.662	-0,1%	1,3%	-0,2%
6.4 (2)	631	4.228	24.088	631	4.163	23.971	0,0%	1,6%	0,5%
Total	29.060.973	173.273	238.288	29.067.189	172.328	238.231	0,0%	0,5%	0,0%

Fuente: CNMC y Memoria que acompaña a la propuesta de Orden

Tabla 31: Previsiones para 2017 sobre el número de clientes, la potencia facturada y el consumo de la propuesta de Orden según la Memoria que acompaña a la propuesta de Orden de Peajes, y de la CNMC

²² IPN/CNMC/029/16 Ingresos y costes del Sistema Eléctrico Liquidación 13/2013 Informe sobre la Propuesta de Orden por la que se establecen los peajes de acceso de energía eléctrica para 2017.



Análisis de viabilidad de incorporar una batería para almacenamiento de energía eléctrica

Es decir, del orden de 2,4 millones de clientes, en su mayor parte viviendas, están acogidos a este tipo de peajes de acceso que proporciona precios del término de energía reducidos 14 h al día a cambio de precios con recargo durante las 10 h restantes:



Figura 51: Discriminación horaria invierno y verano, horarios de precios reducidos y con recargo. Fuente: Esios

En muchos casos, las viviendas que se acogen a esta tarifa ya disponen de un sistema de calefacción eléctrica mediante acumuladores térmicos que generan calor mediante el uso de resistencias en las horas valle. Este calor se acumula en materiales refractarios y se libera a las estancias a calentar lentamente a lo largo de las horas en que se precisa, durante el día o la noche. Asimismo, para el ACS se suele utilizar un acumulador termoeléctrico que durante la noche calienta el agua necesaria para el consumo del día siguiente. Por tanto, el almacenamiento nocturno de electricidad para calefacción no es novedoso. Lo que se trata de ver en este apartado es si es interesante hacerlo en forma de electricidad en una batería en lugar de hacerlo en forma de calor en un material refractario.

En nuestro caso vamos a analizar la posibilidad de almacenar parte de la electricidad que precisa el sistema de aerotermia y los consumos eléctricos convencionales de la vivienda durante las horas con recargo (horas punta)



Análisis de viabilidad de incorporar una batería para almacenamiento de energía eléctrica

mediante una sistema de batería e inversor, almacenando en horas valle o de precio reducido.

Como elemento de almacenamiento de electricidad se ha contemplado una Batería de prestaciones similares al modelo Powerwall de Tesla:



Figura 52: Características técnicas Powerwall Tesla. Fuente: Tesla

4.1 MODELADO DEL CICLO DIARIO DE ALMACENAMIENTO Y DESCARGA

De forma simplificada, el análisis se ha realizado a partir de la carga horaria que demanda la vivienda a lo largo las 8.760 h del año, compuesta por los consumos convencionales más los del sistema aerotérmico y de los precios horarios del términos de energía del peaje 2.0 DHA.

Para cada bloque de 24 h consecutivas se ha supuesto que la carga horaria se realiza a un ritmo máximo de 4 kWh/h durante las tres horas de menor precio



Análisis de viabilidad de incorporar una batería para almacenamiento de energía eléctrica

de la energía del bloque de horas valle, hasta alcanzar la capacidad nominal de la batería, 13,5 kWh. Durante esas horas la carga de la batería se suma al consumo de la vivienda. (La información sobre los precios horarios del día siguiente de los PVPC está disponible “desde las 20:15 horas del día anterior en la web del operador del sistema y a través de la aplicación SmartVIu del Apple Store.”)

Para seleccionar las horas en que la vivienda se abastece parcialmente de la energía acumulada, después de diversos tanteos, se ha visto que sería razonable suponer que se utiliza la energía almacenada en la batería durante las 10 h de mayor precio del día, siempre y cuando la relación entre el precio de la energía en la hora de “descarga” y el precio medio de la energía de carga sea superior a 1,5²³ veces. Como límite inferior de carga a mantener en la batería para evitar la reducción de su vida útil se ha fijado mantener siempre 1,5 kWh y una descarga máxima de 4 kWh/h.

Con estas restricciones, se han utilizado los precios del término de energía del PVPC 2.0 DHA de tres años (desde 1 de abril de 2014 a 31 de marzo de 2017) junto con la demanda de la vivienda de las 8.760 h de referencia obteniéndose los resultados mostrados en la *Tabla 32*.

²³ Para no desperdiciar un ciclo de vida útil de la batería



Análisis de viabilidad de incorporar una batería para almacenamiento de energía eléctrica

Horas anuales de carga	923
Horas anuales de descarga	3.135
Descarga media por hora	-1,00 kWh/h
Consumo en carga de batería	3.505 kWh/año
Energía aportada desde batería	-3.153 kWh/año
Ahorro por diferencia de precio horario	-323 €/año Impuestos eléctricos e IVA incluidos

Tabla 32: Resultados de la incorporación de una batería en el sistema de aerotermia. Fuente: Elaboración Propia.

En definitiva, la simulación realizada indica que sería posible un ahorro en el término de consumo de energía del orden de 323 € al año mediante la utilización como equipo auxiliar de la vivienda de una batería con el régimen de utilización descrito²⁴. Ello si bien supondría una reducción del 20% de la factura eléctrica anual de la vivienda, requeriría de una importante inversión en la adquisición de la batería/inversor y el sistema de control, como se expone más adelante.

También es preciso indicar que el ahorro obtenido con las tres series de datos anuales del término de energía del PVPC 2.0 DHA que se han confrontado con la misma serie cronológica de demanda de la vivienda objeto de estudio se ha ido reduciendo a lo largo de los tres años considerados, de abril 2014-marzo 2015, abril 2015-marzo 2016, abril 2016-marzo 2017, como se indica en la *Tabla 33*.

²⁴ Es posible que se pudiera optimizar el coste del término de potencia, reduciendo en un escalón (1,1 kW) la potencia contratada, pero no se ha contemplado en los cálculos económicos.



Análisis de viabilidad de incorporar una batería para almacenamiento de energía eléctrica

Abril 2014-Marzo 2015	-344 €
Abril 2015- Marzo 2016	-321 €
Abril 2016- Marzo 2017	-305 €
Media período 3 años	-323 €

Tabla 33: Evolución temporal del ahorro anual debido al almacenamiento mediante baterías (€/año). Fuente: Elaboración propia

4.2 ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA DEL ALMACENAMIENTO DE ELECTRICIDAD CON BATERÍA EN UNA VIVIENDA

Si bien, como se ha indicado la utilización de batería reduce el coste económico del consumo eléctrico, es necesario contemplar su viabilidad económica.

Según la compañía fabricante y comercializadora del sistema de almacenamiento y control, el coste previsto para su comercialización en España es el siguiente:

Coste batería Powerwall de 14 kWh	6.300 € IVA incluido
Equipo de soporte y control	550 €
Coste de puesta en marcha	900 €
TOTAL	7.750 €

Tabla 34: Costes batería Powerwall TESLA. Fuente: TESLA



Análisis de viabilidad de incorporar una batería para almacenamiento de energía eléctrica

Además, según se ha expuesto, la reducción de costes prevista es de 323€/año (impuestos incluidos), por tanto, calculando el Payback simple, sin aplicar siquiera una tasa de descuento:

$$\text{Payback simple} = \frac{7.750}{323} = 24 \text{ años}$$

Este resultado está muy por encima de lo que podría ser un valor razonable que podría considerarse en 6-8 años e incluso por encima de la vida útil, estimada en 15 años.

En definitiva, no parece que al menos a los niveles actuales de coste los equipos de almacenamiento doméstico (550 €/KW de capacidad de almacenamiento), sea viable esta práctica con fines de reducción de costes del suministro exclusivamente²⁵. Para que pudieran empezar a ser viables económicamente su precio debería reducirse en un 70% (hasta unos 170€/kW), incluyendo la programación y control e instalación.

De acuerdo con el estudio llevado a cabo por Bloomberg, New Energy Finance, el precio de las baterías de ion-litio para vehículos, ha ido evolucionando según se muestra en la *Figura 53*, y, según las estimaciones mostradas en la *Figura 54* se espera que para el año 2.025, este precio se haya alcanzado.

²⁵ Cuestión distinta sería si se necesitase una garantía de suministro absoluta por motivos de dependencia médica, sistemas informáticos, ...



Análisis de viabilidad de incorporar una batería para almacenamiento de energía eléctrica

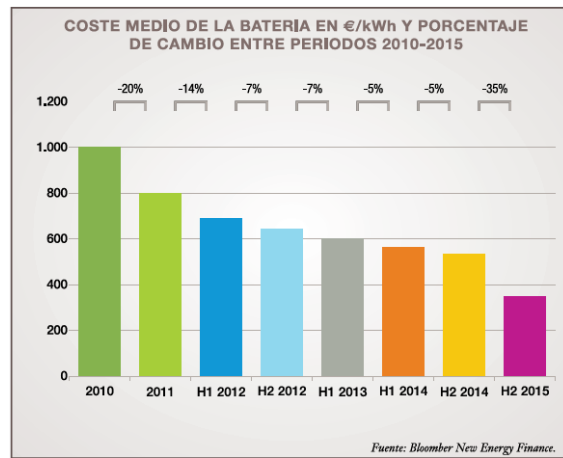


Figura 53: Evolución y variación de precio de las baterías de ión-litio. Fuente: Bloomberg New Energy Finance.

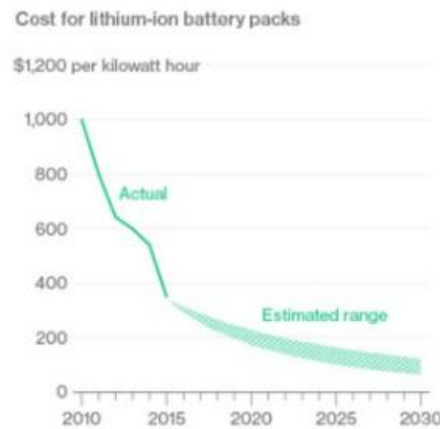


Figura 54: Estimación de la evolución del precio de las baterías de ión-litio (\$/kWh). Fuente: Bloomberg New Energy Finance.

Análisis de sensibilidad a la capacidad de almacenamiento de la batería

Por último, se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad para distintos tamaños de batería. Suponiendo que los valores de los parámetros empleados para modelizar los ciclos de carga y descarga que se han explicado anteriormente (nivel mínimo de carga, velocidad máxima de carga y descarga...), son



Análisis de viabilidad de incorporar una batería para almacenamiento de energía eléctrica

proporcionales a la capacidad de almacenamiento de la batería, se han obtenido los resultados mostrados en la *Figura 55* y la *Figura 56*.

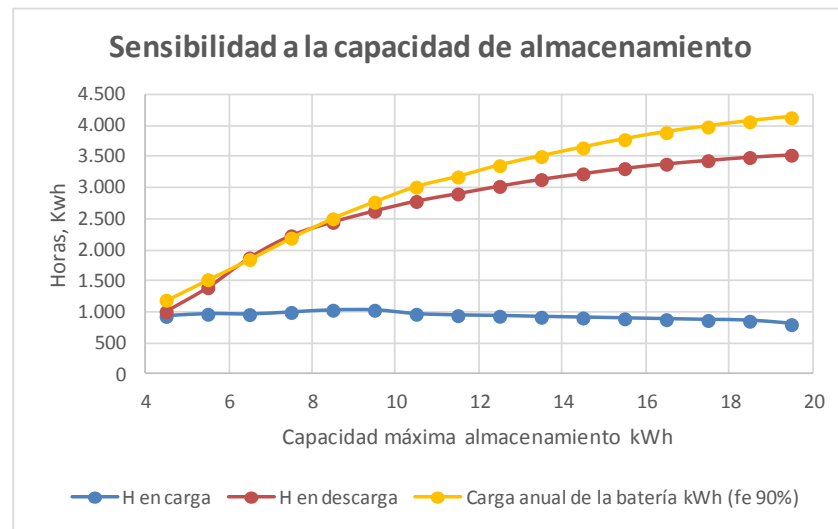


Figura 55: Análisis de sensibilidad a la capacidad de almacenamiento de la batería. Fuente: Elaboración Propia

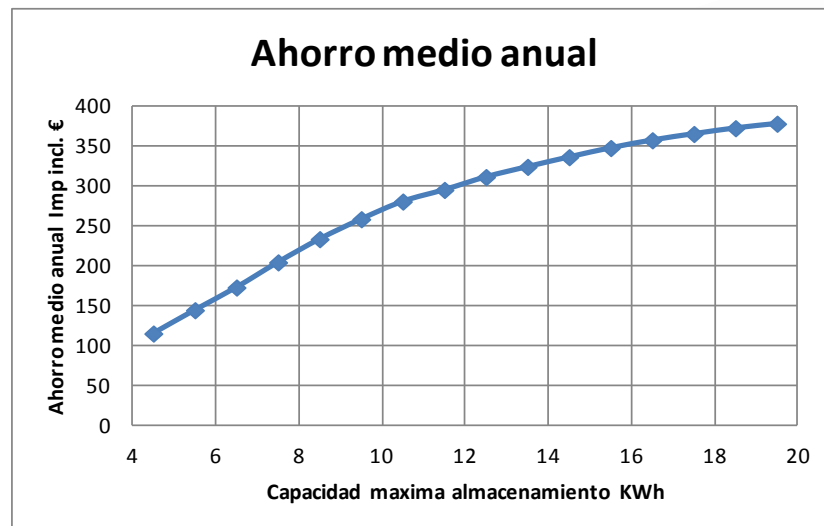


Figura 56: Ahorro medio anual en función de la capacidad de almacenamiento de la batería. Fuente: Elaboración Propia



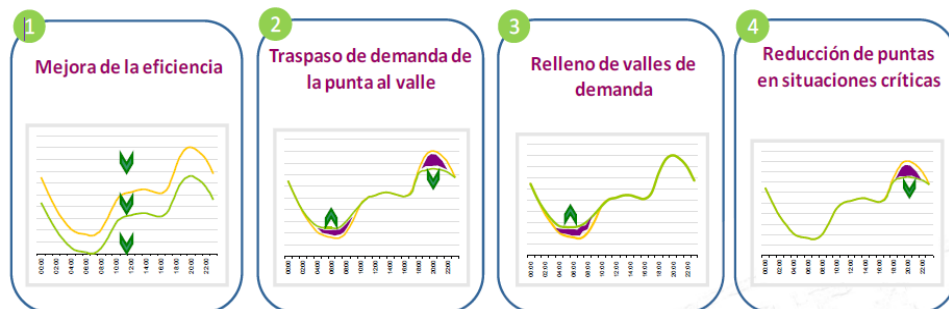
Análisis de viabilidad de incorporar una batería para almacenamiento de energía eléctrica

Se puede observar, que, aunque los ahorros medios anuales, en términos absolutos, se verían incrementados al aumentar la capacidad de la batería, los ahorros marginales²⁶, comenzarían a disminuir precisamente en un valor próximo a los 13,5 kWh, que es justamente la capacidad de la batería que se ha empleado (según se observa alrededor de ese punto hay un cambio de curvatura en la gráfica).

Para poder realizar un análisis de viabilidad económica completo, como se ha hecho con la batería de 13,5 kWh, sería necesario disponer de precios de mercado de baterías que tuvieran las capacidades de almacenamiento en cuestión. En el mercado español, no están muy extendidas a día de hoy.

Mecanismo de gestión de la demanda para el sistema eléctrico

Por otro lado, existirían otro tipo de ventajas, tanto para el sistema eléctrico como para el usuario.



Mecanismos de gestión de la demanda

Figura 57: Mecanismos de gestión de la demanda. Fuente: Máster Ejecutivo REE

- Se trataría de una medida de gestión de demanda efectuada por los consumidores en la que estos asumen un mayor consumo eléctrico (la

²⁶ Para el caso concreto de la vivienda de estudio



Análisis de viabilidad de incorporar una batería para almacenamiento de energía eléctrica

pérdida del ciclo de carga de la batería, un 10% aproximadamente) para beneficiarse de unos menores costes totales de la energía.

- Favorece la explotación del parque generador y del transporte y distribución, al aumentar el consumo en los periodos de menor demanda y reducir por tanto el consumo en los periodos de mayor demanda.
- Contribuiría a una mayor integración de algunas energías renovables en la medida que se incrementa el consumo en horas en que la probabilidad de existencia de excedentes de generación (eólica) es más elevada.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Análisis de viabilidad de incorporar una batería para almacenamiento de energía
eléctrica



Capítulo 5 CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES

A lo largo de este proyecto se ha estudiado:

- El interés económico de la utilización de un sistema de aerotermia mediante bomba de calor para satisfacer las necesidades energéticas de calefacción, refrigeración y ACS en una vivienda de 130 m² climatizados situada en zona climática Continental (D3).

Como alternativas de referencia se ha contemplado el equipamiento de la vivienda con caldera de gas natural y con caldera de gasóleo, en ambos casos incorporando un sistema de aire acondicionado para refrigeración.

Se ha supuesto que, en el caso de aerotermia, la vivienda se acoge a los precios PVPC con discriminación horaria de dos períodos 2.0 DHA analizándose el período abril 2014-marzo 2017; en el caso del Gas natural la tarifa utilizada es la TUR 2 y como precios del gasóleo se ha utilizado la media del período indicado.

Como principal resultado se obtiene que el sistema aerotérmico es plenamente competitivo frente a los otros dos equipamientos y ofrece costes unitarios de la energía final útil entre un 15% y más de un 30% inferiores a lo largo de la vida útil (15 años), en función de la tasa de descuento que se utilice (1%-5%). Ello equivale a ahorros entre 2.500 € y 7.500 € a lo largo de la vida útil.

- En segundo lugar, para la vivienda dotada de sistema de aerotermia, se ha analizado la viabilidad de complementar el equipamiento con una batería que permita aprovechar al máximo las ventajas de la discriminación horaria de la tarifa 2.0 DHA, tanto para los consumos del sistema aerotérmico como los consumos eléctricos convencionales de la vivienda. Para ello se ha optimizado la curva cronológica de consumo de la vivienda cargando la batería en las horas de menor precio horario y usando la energía acumulada en las horas de mayor precio del periodo punta.



Como resultado se obtiene que, si bien con la batería se podría lograr un ahorro en el entorno del 20% en el coste del término de energía, la inversión necesaria con los costes actuales del almacenamiento hace poco razonable desde el punto de vista económico esta opción. Para que se pudiese contemplar su viabilidad, sería necesario una reducción de los costes del almacenamiento de aproximadamente un 70% respecto al precio actual. Según diversas fuentes, ese nivel de costes tardará unos diez años en lograrse.



Capítulo 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Comisión Europea, «Hoja de ruta de la Energía para 20150,» Bruselas, 2011.
- [2] Comision Europea Acción por el Clima, «Comision Europea Acción por el Clima,» 2017. [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_es.
- [3] Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones, «Estrategia de la UE relativa a la calefacción y la refrigeración,» Bruselas, 2016.
- [4] BOE, «Documento Básico HE Ahorro de Energía».
- [5] P. G. J. C. (. André Pierrot, «Nuevos requisitos europeos sobre eficiencia energética para equipos de aire acondicionado».
- [6] RITE, «Prestaciones medias estacionales bombas de calor».
- [7] Euroserv'ER, «Heat Pump Barometer,» 2016.
- [8] EHPA European Heat Pump Association, «European Heat Pump Market and Statistics Report 2015,» 2015.
- [9] IDADE, «Síntesis del Estudio Parque de bombas de calor en España,» 2104.
- [10] ATECYR e IDAE, «Guía técnica de condiciones climáticas exteriores de proyecto,» Madrid, 2010.
- [11] AICIA e IDAE, «Escala de calificación energética para edificios existentes,» Madrid, 2011.
- [12] AFEC , Comunidad de Madrid, Fundadción dela Energía de la Comunidad de



Madrid, «Plan de Promoción de la Bomba de Calor,» Madrid, 2016.

[13] «d».

[14] E. Serrano, «El Almacenamiento de la electricidad distribuido, origen, estado del arte e implicaciones».

[15] J. C. R. L. Ryan Hledik, «The hidden battery. Opportunities in electric water heating,» 2016.

[16] DIMPLEX, «Project planning manual heating and cooling with heat pumps,» 2008.

[17] Unef, «UNEF Informe anual 2016,» 2016.

[18] MIT en colaboración con IIT COMILLAS, «Utility of the future».

[19] Bloomberg, «New Energy Finance».