

MÁSTER UNIVERSITARIO EN
Investigación en Eficiencia Energética y
Sostenibilidad en Industria, Transporte,
Edificación y Urbanismo

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***INCORPORACIÓN DE BOMBAS DE CALOR
(AEROTÉRMICA / GEOTÉRMICA) EN LAS
INSTALACIONES DEL LCCE***

Estudiante
Director/Directora

Garro Aguilar, Mikel
Picallo Pérez, Ana

Departamento
Curso académico

Ingeniería Energética
2021/2022

Bilbao, 2022



AGRADECIMIENTOS

“A mis docentes y en especial a mi tutora, Ana Picallo Perez, por su ayuda, paciencia y dedicación.

Agradecer también el trato recibido por todos los compañeros y trabajadores del LCCE, en especial a Jose María Sala Lizarraga, por transmitirme su visión y experiencia. Señalar la información recibida por Soningeo S.L. sobre la auditoría energética del LCCE.

A mis compañeros de aula por ser una fuente de sabiduría y grupo de contraste para resolver todas mis dudas e inquietudes.

Por último, a toda mi familia y amigos por darme ánimo durante este proceso.”



ABSTRACT

This research work deals with the refurbishment of the thermal installations of the LQCB (Laboratory for Quality Control in Building), specifically the installations that supply the heating demands of this building. To this end, the current installations are initially analysed with the aim of improving them and then different refurbishment options are proposed in order to study their viability and profitability, both economically and environmentally. Among these proposals are the implementation of geothermal technology, aerothermal technology without any boiler support for when the demand is very high and aerothermal technology with boiler support for when the demand is very high. Between the three options, it can be seen that the geothermal installation is neither logistically nor economically viable, but it does provide an environmental benefit by reducing CO₂ emissions into the atmosphere. The aerothermal installation with back-up boilers is viable from a logistical point of view, as there would be no need to carry out any building work or change the hydraulic circuit, but it is not economically or environmentally profitable. And finally, the aerothermal installation without back-up boilers is viable and profitable from all points of view, logistically, economically and environmentally. Therefore, the chosen proposal for the rehabilitation of the current installations would be the aerothermal installation without back-up boilers.

Key Words:

Energy rehabilitation, Heat pump, Aerothermal, Geothermal, LCCE, Thermal installation, Dimensioning



LABURPENA

Ikerketa lan honek EKLLko (Eraikuntzaren Kalitatea Kontrolatzeko Laborategia) instalazio termikoak birgaitzeari buruz dihardu, zehazki, eraikin horretako berokuntza-eskaerak hornitzen dituzten instalazioei buruz. Horretarako, hasiera batean, egungo instalazioak aztertzen dira, hauek hobetzeko asmoz, eta, ondoren, birgaitzeko hainbat aukera proposatzen dira, bideragarritasuna eta errentagarritasuna aztertzeko, bai logistikoa, ekonomikoa eta baita ingurumenekoa ere. Proposamen horien artean, teknologia geotermikoa, teknologia aerotermikoa galdaren inolako laguntzarik gabe, eskaria oso handia den uneetan bero ponpei laguntzeko, eta teknologia aerotermikoa galdaren laguntzarekin eskaria oso handia den uneetan bero ponpei laguntzeko. Hiru aukeren artean, ikus daiteke instalazio geotermikoa ez dela bideragarria, ez logistikoki ez ekonomikoki, baina ingurumen-onura dakarrela, atmosferara CO₂ gutxiago isurtzen duelako. Laguntza-galdarak dituen instalazio aerotermikoa bideragarria da logistikaren ikuspegitik, ez bailitzateke obrarik egin behar, ezta zirkuitu hidraulikoa aldatu ere, baina ekonomikoki eta ingurumenaren aldetik ez da batere errentagarria. Eta, azkenik, laguntza-galdararik gabeko instalazio aerotermikoa bideragarria eta errentagarria da ikuspegi guztietatik, logistikoki, ekonomikoki zein ingurumenari dagokionez. Beraz, egungo instalazioak birgaitzeko aukeratutako proposamena galdara euskarririk gabeko instalazio aerotermikoa izango litzateke.

Hitz gakoak:

Errehabilitazio energetikoa, Bero-ponpa, Aerotermia, Geotermia, LCCE, Instalazio termikoa, Dimentsionamendua



RESUMEN

El presente trabajo de investigación trata sobre la rehabilitación de las instalaciones térmicas del LCCE (Laboratorio de Control de la Calidad en la Edificación), en concreto las instalaciones que abastecen las demandas de calefacción de dicho edificio. Para ello se analizan inicialmente las instalaciones actuales con el objetivo de mejorarlas y después se proponen diferentes opciones de rehabilitación para estudiar su viabilidad y rentabilidad, tanto económica como medioambiental. Entre esas propuestas están la implementación de la tecnología geotérmica, de la tecnología aerotérmica sin ningún apoyo de calderas para cuando la demanda sea muy elevada y de la tecnología aerotérmica con el apoyo de calderas para cuando la demanda sea muy elevada. Entre las tres opciones, se puede observar que la instalación geotérmica no es viable ni logística ni económicamente pero sí que supone un beneficio medioambiental por su reducción de emisiones de CO₂ a la atmosfera. La instalación aerotérmica con calderas de apoyo es viable desde el punto de vista logístico, ya que no habría que realizar ninguna obra ni cambiar el circuito hidráulico, pero económica y medioambientalmente no es nada rentable. Y, por último, la instalación aerotérmica sin calderas de apoyo es viable y rentable desde todos los puntos de vista, tanto logística, económica como medioambientalmente. Por lo tanto, la propuesta elegida para la rehabilitación de las actuales instalaciones sería la de la instalación aerotérmica sin calderas de apoyo.

Palabras Clave:

Rehabilitación energética, Bomba de calor, Aerotermia, Geotermia, LCCE, Instalación térmica, Dimensionamiento



ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	11
1.1	Bombas de calor	11
1.2	Bases teóricas de las bombas de calor	14
2	CONTEXTO	15
3	OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO	16
4	BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO	17
5	ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE	17
5.1	Artículos relacionados con la rehabilitación de edificios basados en bombas de calor 17	
5.2	Artículos relacionados con la hibridación de tecnologías de instalaciones para diferentes edificios	19
5.3	Artículos relacionados con el diseño y dimensionamiento de instalaciones aerotérmicas	22
5.4	Artículos relacionados con el diseño y dimensionamiento de instalaciones geotérmicas	24
5.5	Consideraciones del estado del arte	25
6	ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO	26
6.1	Descripción de la instalación actual.....	26
6.1.1	Características del edificio principal	26
6.1.2	Características del edificio PMC.Lab	27
6.1.3	Demandas térmicas de calefacción y ACS en el edificio LCCE	27
6.2	Descripción de las BC escogidas para el análisis.....	30
6.3	Análisis geotérmico	32
6.3.1	Elección de las bombas de calor	32
6.3.2	Elección del fluido circulante	32
6.3.3	Elección de la configuración a emplear	32
6.3.4	Elección del tubo	32
6.3.5	Dimensionamiento del intercambiador de calor enterrado	33
6.4	Análisis aerotérmico sin caldera de apoyo.....	38
6.4.1	Nuevos elementos terminales	42



6.5	Análisis aerotérmico con caldera de apoyo	43
6.5.1	Nuevos elementos terminales	47
6.6	Análisis económico de las diferentes opciones.....	48
6.6.1	Análisis económico de la instalación geotérmica	48
6.6.2	Análisis económico de la instalación aerotérmica sin caldera de apoyo	50
6.6.3	Análisis económico de la instalación aerotérmica con caldera de apoyo	51
6.7	Análisis medioambiental de las diferentes opciones	53
6.7.1	Análisis medioambiental de la instalación geotérmica	54
6.7.2	Análisis medioambiental de la instalación aerotérmica sin caldera de apoyo	54
6.7.3	Análisis medioambiental de la instalación aerotérmica con caldera de apoyo	55
6.8	Implicaciones del trabajo.....	57
7	ANEXO I: DESCRIPCIÓN DE LAS TAREAS.....	62
7.1	DIAGRAMA DE GANTT	62
8	ANEXO II: DESCRIPCIÓN DEL PRESUPUESTO	63
8.1	HORAS INTERNAS.....	63
8.2	GASTOS.....	63



LISTA DE TABLAS

Tabla 6.1. Características de las bombas de calor elegidas	30
Tabla 6.2. Precios de las BC del estudio.....	31
Tabla 6.3. Datos necesarios para calcular el Fh del Main.B.....	35
Tabla 6.4. Configuración requerida para la BC del edificio Main.B.....	36
Tabla 6.5. Datos reales del intercambiador de la BC geotérmica del edificio Main.B.....	37
Tabla 6.6. Datos necesarios para calcular el Fh del PMC.Lab	37
Tabla 6.7. Configuración requerida para la BC del edificio PMC.Lab	38
Tabla 6.8. Datos reales del intercambiador de la BC geotérmica del edificio PMC.Lab	38
Tabla 6.9. Ahorro energético del edificio Main.B con los elementos terminales nuevos.....	42
Tabla 6.10. Ahorro energético del edificio PMC.Lab con los elementos terminales nuevos.....	43
Tabla 6.11. Características de las BC elegidas.....	44
Tabla 6.12. Ahorro energético eléctrico del edificio Main.B con los elementos terminales nuevos	48
Tabla 6.13. Ahorro energético eléctrico del edificio PMC.Lab con los elementos terminales nuevos	48
Tabla 6.14. Presupuesto de la instalación geotérmica	49
Tabla 6.15. Gastos anuales eléctricos vs gas natural.....	49
Tabla 6.16. Presupuesto de la instalación aerotérmica sin caldera de apoyo	50
Tabla 6.17. Gastos anuales eléctricos vs gas natural.....	51
Tabla 6.18. Presupuesto de la instalación aerotérmica con caldera de apoyo.....	52
Tabla 6.19. Gastos anuales de instalación actual vs instalación propuesta.....	52
Tabla 6.20. Gastos mensuales de la instalación actual vs propuesta con mismas horas de funcionamiento (8:00h-18:00h).....	53
Tabla 6.21. kgCO ₂ /kWh de gas natural y de electricidad	54
Tabla 6.22. kg CO ₂ de gas natural vs electricidad.....	54
Tabla 6.23. kg CO ₂ de gas natural vs electricidad	54
Tabla 6.24. kg de CO ₂ de la instalación actual vs propuesta	55
Tabla 6.25. Tabla resumen de las opciones propuestas	56
Tabla 8.1. Costes de las horas internas.....	63
Tabla 8.2. Gastos.....	63



LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Consumo energético medio de una vivienda residencial.....	11
Figura 1.2. Esquema conceptual de la bomba de calor	12
Figura 1.3. Ciclo termodinámico de la bomba de calor	12
Figura 1.4. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor reversible	13
Figura 6.1. Foto frontal y aérea del LCCE.....	26
Figura 6.2. Foto de la caldera estandar.....	28
Figura 6.3. Esquema de principio de la caldera del Main.B.....	28
Figura 6.4. Esquema de principio de la caldera del PMC.Lab	29
Figura 6.5. Análisis económico BC aerotérmicas.....	31
Figura 6.6. Características físicas de los fluidos caloportadores.....	32
Figura 6.7. Sistema en serie vertical	32
Figura 6.8. Demanda de calefacción en LCCE el mes de enero.....	39
Figura 6.9. Potencia absorbida, potencia calorífica y COP en función de la temperatura exterior de la BC PMC.Lab	40
Figura 6.10. Potencia absorbida, potencia calorífica y COP en función de la temperatura exterior de la BC Main.B.....	40
Figura 6.11. Consumo vs producción eléctrica mensual LCCE	41
Figura 6.12. Consumo vs producción eléctrica mensual con elementos terminales nuevos	42
Figura 6.13. Curva de demanda térmica de los edificios del LCCE	44
Figura 6.14. Potencia absorbida, potencia calorífica y COP en función de la temperatura exterior de la BC Main.B.....	45
Figura 6.15. Potencia absorbida, potencia calorífica y COP en función de la temperatura exterior de la BC PMC.Lab	45
Figura 6.16. Consumo vs producción eléctrica mensual LCCE	46
Figura 6.17. Demanda térmica cubierta por la caldera mensualmente	46
Figura 6.18. Consumo vs producción eléctrica mensual con elementos terminales nuevos	47
Figura 6.19. Demanda térmica cubierta por las calderas con elementos terminales nuevos	47
Figura 7.1. Diagrama de Gantt de las tareas realizadas en el estudio.....	62



ACRONIMOS Y SÍMBOLOS

ACRONIMOS	
ACS	Agua caliente sanitaria
BC	Bomba de calor
COP	Coefficient Of Performance
EER	Energy Efficiency Ratio
GUE	Gas Utilization Efficiency
SPF	Seasonal Performance Factor
SCOP_{net}	Seasonal Coefficient of Performance
SPER_{net}	Seasonal Primary Energy Ratio
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio
FP	Factor de ponderación
FC	Factor de corrección
ASHP	Bomba de calor de aire
LCCE	Laboratorio de Control de la Calidad en la Edificación

MEMORIA

1 INTRODUCCIÓN

La demanda energética de un edificio, que es la energía que el edificio necesita para mantener las condiciones de confort de sus usuarios, puede ser de dos tipos: Térmica (ACS y calefacción/refrigeración) y eléctrica. Esta demanda será diferente según el uso del edificio, comercial, residencial, industrial, de oficina, educacional, sanitario, etc. No obstante, el consumo energético medio de la edificación en España supone un 20% del consumo energético total según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) [1], y poniendo la atención en los edificios residenciales, que representan la mayor parte de la edificación, aproximadamente el 66% del consumo energético viene a ser dado por ACS y calefacción como se puede ver en Figura 1.1, [2].

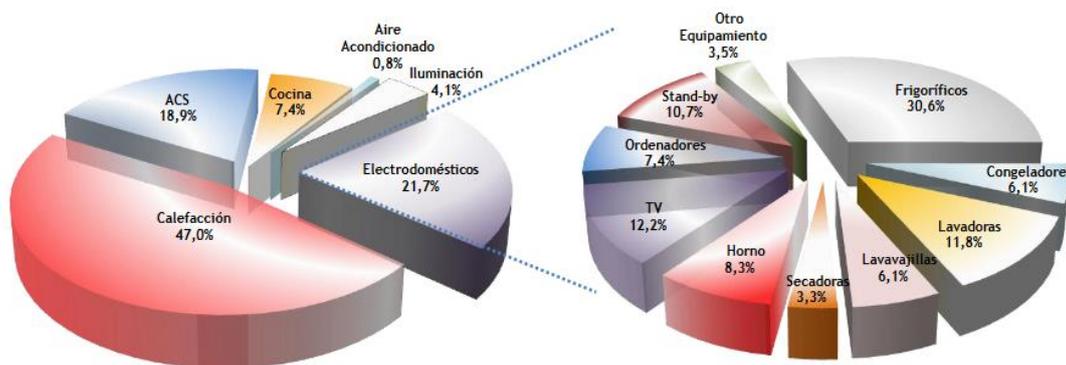


Figura 1.1. Consumo energético medio de una vivienda residencial

Para abastecer la demanda energética se pueden utilizar tanto tecnologías basadas en recursos renovables como no renovables, o incluso con una hibridación. La hibridación de tecnologías puede ser entre tecnologías renovables como no renovables y permiten aumentar la eficiencia energética, económica y/o medioambiental.

1.1 Bombas de calor

Un ejemplo para satisfacer parte de la demanda o incluso completa de energía térmica (ACS y calefacción/refrigeración) es la bomba de calor, la cual es una máquina térmica que recupera calor de un foco frío o de baja temperatura y lo traslada a un foco caliente o de mayor temperatura con un aporte de energía externa que se consigue utilizando un compresor, ver Figura 1.2, [3]. Este compresor puede ser alimentado por diferentes fuentes: si el compresor está accionado por un motor eléctrico la bomba de calor se denominará como bomba de calor eléctrica, y si está accionado por un motor de combustión interna será denominada como bomba de calor a gas, ya que este motor suele ser alimentado con gas natural o propano.

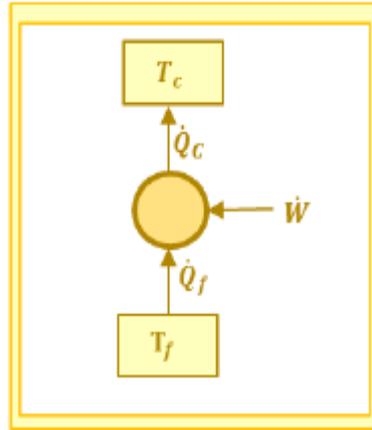


Figura 1.2. Esquema conceptual de la bomba de calor

Las bombas de calor tienen diferentes elementos en su interior para obtener el efecto útil de ellas: condensador, evaporador, compresor y válvula de expansión. Estos componentes forman un circuito cerrado por el que normalmente fluye un refrigerante, ver Figura 1.3, [4].

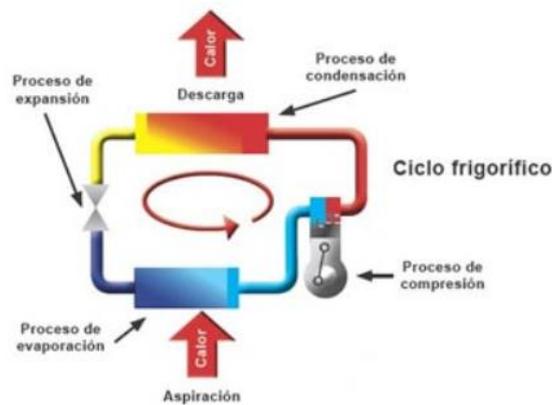


Figura 1.3. Ciclo termodinámico de la bomba de calor

Aunque generalmente el efecto útil de las bombas de calor es la producción de calor o de frío de manera exclusiva, existen configuraciones para que las bombas de calor produzcan frío y calor dependiendo de la época del año y se denominan como un ciclo o bombas de calor reversibles, ver Figura 1.4, [5]. Estas bombas de calor reversibles tienen un quinto elemento que se denomina válvula de 4 vías o de inversión que puede invertir la dirección de flujo del refrigerante dependiendo de la demanda que se quiera abastecer.

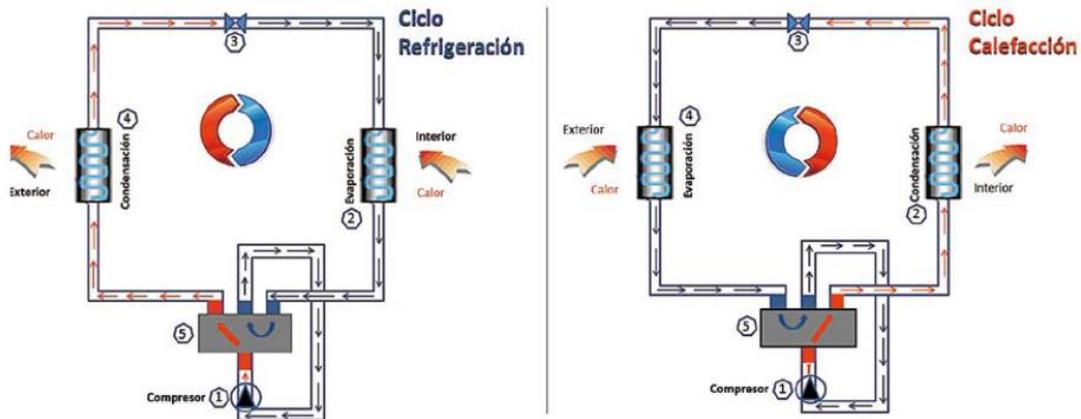


Figura 1.4. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor reversible

Las bombas de calor, además de clasificarlas según su efecto útil, se pueden clasificar según el medio del que la bomba extrae el calor y al que emite el calor extraído:

- **Bomba de calor aire-aire:** La bomba de calor extrae el calor del aire exterior y lo transfiere directamente al emplazamiento que quiera calentarse, o, por el contrario, extrae el calor del emplazamiento que quiere enfriarse para transferirlo directamente al aire exterior o ambiente.
- **Bomba de calor aire-agua:** Al igual que el anterior el calor se extrae del aire exterior y lo transfiere a un circuito con agua en su interior, como podrían ser radiadores, suelos o techos radiantes, acumuladores de ACS, etc.
- **Bomba de calor agua-agua:** Este tipo de bombas de calor extrae el calor mediante un circuito por el que fluye agua que está a su vez en contacto con algún elemento que le proporcionará calor, como puede ser el suelo, para transferirlo mediante un intercambiador de calor o algún tipo de ciclo frigorífico a otro circuito de agua como en la anterior bomba de calor.
- **Bomba de calor geotérmica:** Esta bomba de calor se basa en la anterior bomba de calor, aunque el fluido que fluye por el circuito que recoge el calor del suelo o la tierra puede ser un fluido caloportador de características específicas, y este transmitirá el calor a un ciclo frigorífico como el de la Figura 1.3.
- **Bomba de calor aerotérmica:** La bomba de calor aerotérmica puede trabajar como una bomba de calor aire-aire calentando o enfriando el aire interior de un emplazamiento o puede trabajar como una bomba de calor aire-agua calentando el agua de un circuito que lleve el agua caliente a radiadores, suelos o techos radiantes... Esto es gracias a el ciclo frigorífico que tienen en su interior este tipo de bombas de calor.

1.2 Bases teóricas de las bombas de calor

Fijando la atención de nuevo en la Figura 1.2 y realizando un balance de energía en ese esquema se obtiene la siguiente ecuación para el ciclo termodinámico de la bomba de calor, siendo \dot{Q}_f el calor intercambiado con el foco frío, \dot{Q}_c el calor intercambiado con el foco caliente y \dot{W} el trabajo realizado por el compresor [3]:

$$\dot{Q}_f + \dot{W} = \dot{Q}_c \quad (1)$$

El trabajo realizado por el compresor (\dot{W}) tiene una gran importancia, ya que si este trabajo es de un valor elevado para conseguir un calor intercambiado con el foco caliente no tan elevado la tecnología de bomba de calor no sería una tecnología eficiente, ya que su coeficiente de eficiencia denominado coeficiente de uso (Coefficient of performance, COP) tendría un valor bajo, cercano a 1, lo que correspondería a que hace falta invertir mucha potencia en el compresor para conseguir una baja demanda de calor, calculándose el COP de la siguiente forma:

$$COP = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}} = 1 + \frac{\dot{Q}_f}{\dot{W}} > 1 \quad (2)$$

Y si está el compresor está accionado eléctricamente, el COP se calculará con la siguiente fórmula:

$$COP = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}} \quad (3)$$

Si el objetivo de la bomba de calor es refrigerar en vez de calentar y el compresor está accionado eléctricamente, la eficiencia se denomina factor de eficiencia, EER (Energy efficiency ratio), y se calcula de la siguiente forma:

$$EER = \frac{\dot{Q}_f}{\dot{W}} \quad (4)$$

Sin embargo, si el compresor está accionado por un motor de combustión interna, la eficiencia de la bomba de calor se denominará como eficiencia en la utilización del gas, GUE, y en esta se tendrá en cuenta además del consumo de gas, \dot{F} , y el consumo de electricidad asociado a auxiliares como bombas y/o ventiladores que son necesarios para transportar el calor cedido por la bomba, \dot{E}_{aux} , el calor útil cedido por la refrigeración del motor, \dot{Q}_m :

$$GUE = \frac{\dot{Q}_c + \dot{Q}_m}{\dot{F} + \dot{E}_{aux}} \quad (5)$$

Una vez determinadas las eficiencias nominales hay que determinar si la BC en estudio se puede considerar como renovable o no, y esto se determina mediante el rendimiento medio estacional o SPF (Seasonal performance factor). El SPF se denomina específicamente rendimiento medio estacional neto en modo activo para bombas de calor accionadas eléctricamente ($SCOP_{net}$), o relación estacional neta de energía primaria en modo activo ($SPER_{net}$) en las bombas de calor accionadas térmicamente, y para las bombas de calor que producen frío se define el factor de eficiencia energética estacional. Para calcularlo hay que



seguir la norma UNE-EN 14825:2012 [6] y la norma UNE-EN 12309:2015 [7]. En el caso de una bomba de calor funcione en modo de refrigeración, el factor de eficiencia energética estacional se obtiene de acuerdo con la norma UNE-EN 14825:2014 [8].

Estos factores son más realistas, ya que las eficiencias nominales definidas anteriormente, como bien dice su nombre, están calculadas basándose en que las bombas de calor están trabajando al 100% en todo momento, y esto es irreal, ya que las bombas de calor se diseñan para que trabajen al 100% durante todo el tiempo. Por ello en el caso de que, por ejemplo, solo se conozca el valor de COP , el $SCOP_{net}$ será calculado utilizando un factor de ponderación (FP), que depende de la zona climática en la que esté trabajando la BC y un factor de corrección (FC), que depende de la temperatura de uso de la BC, IDAE 2014 [9]:

$$SCOP_{net} = COP \cdot FP \cdot FC \quad (6)$$

Conocido el valor de SPF, la bomba de calor se puede considerar renovable si su valor supera el valor indicado en la Decisión de la Comisión de 1 de marzo de 2013 [10], que dice que de conformidad con el anexo VII de la Directiva 2009/28 [11] los Estados miembros se cerciorarán de que solo se tengan en cuenta las bombas de calor con un SPF superior a 1,15, siendo η la eficiencia del sistema de energía, que en la Unión Europea se le fijó un valor medio de 45,5%.

Por lo tanto, si la eficiencia del sistema de energía se fija en el 45,5 %, el SPF mínimo de las bombas de calor accionadas eléctricamente ($SCOP_{net}$) que debe considerarse como energía renovable según la Directiva es 2,5.

Sin embargo, en las bombas de calor accionadas mediante energía térmica, la eficiencia del sistema de energía es igual a 1. El SPF mínimo ($SPER_{net}$) de ese tipo de bombas es 1,15 para su consideración como energía renovable según la Directiva.

2 CONTEXTO

Para analizar el contexto actual de la bomba de calor (BC) hay que estudiar profundidad las normativas actuales que conciernen a las BC y su papel en el objetivo de descarbonización tan sonado últimamente.

Analizando las normativas actuales del Gobierno de España, se puede ver la clara intención de este por implementar el uso de las bombas de calor. En 2019 el CTE (Código Técnico de la Edificación) fue modificado por el Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre [12], y en este se potencia claramente el uso de las energías renovables reduciendo el valor límite del consumo de energía primaria no renovable. Además, se potencia también usar estas cerca o en los propios edificios aumentando la contribución mínima de energía renovable para producir ACS, donde entra en juego claramente el uso de las bombas de calor.

El 23 de marzo de 2021 concretamente, el RITE (Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios) también fue modificado por el Real Decreto 178/2021 [13], en el cual se introducen requisitos para las instalaciones térmicas con el fin de contribuir a las medidas de eficiencia energética que se incluyen en el Plan Nacional de Energía y Clima, el cual ayudará al cumplimiento del objetivo de ahorro de energía final que establece el artículo VII de la Directiva 2010/31/UE [14]. Además, con la intención de contribuir en objetivo de reducción de consumo de energía primaria en un 39,5% para el 2030 se proponen medidas como la renovación del equipamiento residencial, el fomento de la eficiencia energética en

la edificación del sector terciario y en equipos generadores de frío y grandes instalaciones de climatización del sector terciario e infraestructuras públicas, las cuales muestran una clara intención de introducir tecnologías como la de la BC. Por si esto fuera poco, se modifica también la IT 1.2.4.6, la cual tiene que ver con la contribución de energía renovable o residual para la producción térmica del edificio y se aclaran los requisitos que tiene que cumplir la bomba de calor, con la intención de empujar su uso.

Pero no solo se manifiesta claramente la intención del estado de implementar el uso de las bombas de calor en las normativas actuales, sino que en las estrategias y planes de descarbonización también. Por ejemplo, en el documento “Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo” [15] que el Gobierno de España aprobó el año 2020 se afirma que se espera un aumento en el porcentaje de energías renovables en los sectores de frío y calor, llegando al 97% para 2050, y se le atribuye gran parte del mérito a la contribución de las bombas de calor, especialmente en los sectores residencial y de servicios.

Por lo tanto, queda claro que España apuesta por la bomba de calor, y en especial en el sector residencial y de servicios.

3 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO

El objetivo del presente trabajo es rehabilitar las instalaciones térmicas del LCCE para hibridarlas con tecnología renovable, como por ejemplo bombas de calor (BC).

Como ya se ha comentado previamente, las BC son máquinas térmicas que realizan un ciclo inverso. Estas máquinas trasladan el calor captado de un depósito térmico de baja temperatura a un depósito de temperatura mayor. Para este fin es necesario aportar energía eléctrica que hace que aumente la calidad del calor extraído y este pueda ser aprovechado en aplicaciones que requieran temperaturas cercanas a la ambiental. Esta tecnología está considerada como muy válida para explotar los recursos de baja y de muy baja calidad como son la energía geotérmica de poca profundidad o el calor almacenado en el aire o agua ambiental. La explotación de estos recursos está indicada para su aprovechamiento en el entorno de la edificación para aplicaciones de calor, frío y obtención de ACS.

Por ello, las subtareas a realizar en este apartado corresponden a las siguientes:

- Análisis de tipos de bomba de calor BC (sobre todo aerotermia y geotermia) y estudio de su comportamiento
 - Estudiar la integración en instalaciones térmicas en funcionamiento
- Estudio de consumos y demandas del LCCE.
 - Análisis del sistema térmico actual: componentes y flujos.
 - Recolección de facturas y estudio de necesidades actuales.
- Selección de la BC a incorporar
 - Diseño de la BC. Incorporación en las instalaciones actuales.
 - Análisis económico y viabilidad de ejecución de la obra.
- Ejecución del proyecto (si procede).



4 BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

La rehabilitación del parque de edificios existente se considera una oportunidad importante, ya que más del 35% del parque de edificios europeo tiene más de 50 años y el 75% se considera ineficiente.

- Beneficios económicos:
 - Mejora de la eficiencia energética del edificio del LCCE.
 - Reducción de costes de calefacción y refrigeración mediante la integración de energías renovables.
 - Minimización de los costes totales (inversión y operación) de la instalación HVAC.
- Beneficios sociales:
 - Ahorro en el consumo de energía de calefacción y refrigeración en el LCCE como referente para otros edificios de oficinas.
 - Sensibilización en la implementación de medidas de eficiencia energética.
 - Aumento del confort térmico y la calidad del aire interior en el LCCE, para promover el bienestar y el rendimiento laboral.
- Beneficios ambientales:
 - Reducción del consumo de energía primaria no renovable.
 - Fomentar el uso de energías renovables en edificios de oficinas.
 - Reducción, por ende, de las emisiones de GEI.

5 ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

Un trabajo de investigación requiere conocer previamente los trabajos realizados hasta la fecha sobre las líneas de investigación que se persiguen, cumpliendo en todo momento su normativa [16]. Este estudio, en concreto, se divide en los siguientes apartados:

- Artículos relacionados con la rehabilitación de edificios basados en bombas de calor.
- Artículos relacionados con la hibridación de tecnologías de instalaciones para diferentes edificios
- Artículos relacionados con el diseño y dimensionamiento de instalaciones aerotérmicas
- Artículos relacionados con el diseño y dimensionamiento de instalaciones geotérmicas

Cada artículo se describe a partir de sus objetivos, método de trabajo y los resultados obtenidos.

5.1 Artículos relacionados con la rehabilitación de edificios basados en bombas de calor

Mukhtar et. al [17] revisan las acciones de rehabilitación de edificios y conservación en términos de eficiencia energética. Así, realizan una valuación tecno-ambiental-económica de la readaptación del sistema de bomba de calor en el parque de viviendas. El objetivo de este estudio es analizar los beneficios técnicos y medioambientales al sustituir los actuales



calentadores eléctricos de agua caliente por sistemas de calefacción de agua con bomba de calor de aire y el uso de acondicionadores de aire con bomba de calor de aire para el confort térmico en lugar de los acondicionadores de aire ordinarios existentes para la calefacción y la refrigeración de espacios. Para eso, se presenta una revisión exhaustiva de los recientes avances en la aplicación de la conservación y la eficiencia energética de los edificios, basada en los trabajos de investigación existentes de alta calidad. Además, se readapta el sistema de calefacción/refrigeración y agua caliente de toda una comunidad en Chipre. Como resultados y conclusiones se destaca lo siguiente: gracias a la adaptación de estos sistemas es posible ahorrar una cantidad considerable de energía y reducir la demanda energética global del edificio además de ser una medida fiable desde el punto de vista económico.

Por otro lado, algunas de las estrategias de renovación para fomentar la eficiencia energética en edificios residenciales y de oficinas suecos y de otros países europeos se analizan en el trabajo de Gustafsson [18]. La finalidad de este trabajo es investigar los aspectos económicos y medioambientales de las estrategias de renovación energética, con dos objetivos principales: la renovación de viviendas multifamiliares suecas con caldera centralizada y la renovación de edificios residenciales y de oficinas europeas. Para llevar a cabo este análisis se analizan los costes de ciclo de vida, de impacto ambiental, de impacto energético y de influencia de condiciones climáticas entre otros. La conclusión de este trabajo es que las bombas de calor de aire de escape pueden ser complementos rentables en las viviendas multifamiliares combinándolas con una caldera centralizada.

En cuanto a las soluciones innovadoras para utilizar bombas de calor geotérmicas, Massarotti et. al [19] analizan el caso de un edificio histórico en la ciudad de Nápoles, sur de. Este estudio pretende demostrar que los sistemas geotérmicos de baja entalpía pueden ser empleados como aplicaciones de rehabilitación energética en edificios de interés histórico, artístico y cultural. Para ello se analiza exhaustivamente el lugar del edificio, analizando las características bioclimáticas y topográficas del mismo. Para sacar conclusiones certeras se decide evaluar parámetros como el COP, emisiones de CO₂ y potencia térmica intercambiada con el suelo entre otras. Los resultados obtenidos en el estudio son los siguientes: El COP medio alcanzado es de 5,65, la potencia térmica máxima intercambiada con el suelo en invierno es de 4,5 kW y la mínima 2,5 kW, mientras que en verano como máximo intercambia 18,1 kW y como mínimo 4,6 kW. Respecto al CO₂ reducido, este corresponde a 0,14 tCO₂ en el periodo de este estudio. Por ello, se comprueba que se puede mejorar la eficiencia energética de un edificio histórico mediante bombas de calor geotérmicas, sin provocar ninguna alteración de los aspectos artístico-culturales del edificio, protegidos por las autoridades competentes.

Otras soluciones de rehabilitación en edificios históricos integradas con bombas de calor geotérmicas se encuentran en el trabajo de Carnieletto et. al [20]. Este documento ofrece una visión general de las soluciones de rehabilitación que se pueden tomar en uno de los edificios más antiguos de Padua, Italia. Para realizar el estudio, primeramente, se han tenido en cuenta las características predominantes para este tipo de proyectos; superficie del edificio, demanda energética, clima del lugar, envolvente del edificio... Finalmente, a partir de estas características se ha dimensionado la bomba de calor geotérmica y se han estudiado las consecuencias de esta implantación. Los principales resultados del estudio muestran que las fuentes de energía renovable pueden aprovecharse en la solución de rehabilitación de edificios históricos. Los resultados de las simulaciones ponen de manifiesto las mejoras de ahorro de energía que se puede obtener optimizando el programa de funcionamiento en función de las cargas internas y condiciones climáticas externas.



En cuanto a las rehabilitaciones de edificantes residenciales, Panagiotidou y Rismanchi [21] analizan sistemas alternativos de calefacción y refrigeración en Grecia. Los objetivos del estudio son minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero en funcionamiento y el coste del ciclo de vida. Para ello se analizan las características de los diferentes edificios y se plantean y dimensionan diferentes alternativas como, pueden ser las calderas de gas de condensación, de biomasa, de diésel, bombas de calor aire-agua, aerotérmicas y de absorción de gas entre otras. Después de esto, finalmente, se ha simulado para conocer su rendimiento en el modelo de simulación TRNSYS. Se concluye que las calderas de gas de condensación y las unidades de BC aerotérmicas son los sistemas de acondicionamiento de espacios más comunes en Grecia. Al tener unos costes iniciales y de funcionamiento bajos, son más competitivos frente a otros sistemas de alto rendimiento, pero de alto coste inicial, como las BC de absorción de gas y las BC de aire-agua. Estos últimos serán alternativas competitivas cuando su coste de adquisición disminuya.

5.2 Artículos relacionados con la hibridación de tecnologías de instalaciones para diferentes edificios

Xu et. al [22] estudian la viabilidad y el rendimiento de un sistema híbrido de bomba de calor con fuente de aire para un edificio de muy bajo consumo energético en una región muy fría de China. El objetivo de este trabajo es proponer un innovador sistema energético híbrido de "colector solar de aire + bomba de calor aerotérmica + almacenamiento de energía" que se utiliza para ahorrar energía en edificios de muy bajo consumo en regiones de frío intenso. Así, se presenta el sistema energético híbrido y se analizan las características dinámicas de los componentes clave del sistema en combinación con las condiciones meteorológicas locales. Se obtienen tres grandes conclusiones: (1) la combinación propuesta es eficiente y estable; (2) el rango de temperatura se amplía eficazmente; (3) la combinación "colector solar de aire + aerotermia + almacenamiento de energía" tiene un buen efecto de aplicación en un edificio pasivo de energía casi nula

Los efectos del tamaño en el rendimiento energético de las bombas de calor reversibles alimentadas por aire para edificios de oficinas se estudian en el trabajo de Dongellini et. al [23], donde se pone de manifiesto la influencia en el consumo de energía de los sistemas híbridos. Para ello se consideran la capacidad de modulación de la bomba de calor, el tamaño de la bomba de calor y el clima. En el trabajo se genera un modelo numérico basado en el método bin y en el procedimiento de la firma energética, capaz de tener en cuenta el rendimiento de la bomba de calor a carga parcial, para calcular el rendimiento estacional y anual del sistema de climatización acoplado a un edificio de oficinas típico, situado en tres lugares europeos diferentes (Frankfurt, Estambul, Lisboa). Los resultados numéricos presentados en este documento señalan que el dimensionamiento de la bomba de calor afecta en gran medida al consumo de energía estacional y anual de la climatización.

Por su lado, también relacionado con oficinas y hoteles, Chen et. al [24] analizan el rendimiento integrado de un sistema de calefacción de espacios asistido por colectores fotovoltaicos/térmicos y bomba de calor geotérmica. En este estudio se propone y analiza la combinación entre colectores solares térmicos y bombas de calor geotérmicas integrándolas en un novedoso sistema de calefacción de espacios para su uso en edificios de hoteles y oficinas. Para ello, se construye un modelo de simulación completo del sistema y se valida utilizando el software Engineering Equation Solver (EES). El sistema de calefacción se analiza en función de su rendimiento energético, medioambiental, económico y de flexibilidad utilizando múltiples variables, como el índice de cobertura fotovoltaica, la temperatura ambiente, la irradiación del haz solar y el precio de la electricidad. Los



resultados muestran que la integración de esta combinación puede ser eficaz para complementar la demanda de calefacción de dichos espacios, porque ofrece un ahorro energético del 32%, un ahorro de costes anuales del 9%, una reducción de emisiones del 23% y un exceso de ajuste del 67% en comparación con un sistema puro de bomba de calor geotérmico.

Un sistema híbrido con bomba de calor geotérmica y colectores solares se estudia por Georgiev, et. al [25], donde se analiza la carga de acumuladores térmicos y calefacción de espacios. El artículo presenta una instalación híbrida entre colectores solares térmicos y bomba de calor geotérmica de pequeño tamaño y propone una metodología para determinar las diferentes eficiencias energéticas del sistema. Como resultado, el estudio demuestra la necesidad de cargar el intercambiador de calor con energía térmica solar durante el verano, principalmente para evitar el agotamiento térmico del suelo. La comparación de los tres modos de calefacción investigados muestra una ventaja evidente de la calefacción por bomba de calor geotérmica, aunque los investigadores que han realizado el estudio admiten que las pruebas se hayan hecho en un periodo de tiempo corto.

Un sistema de captación híbrida de energía geotérmica, aerotérmica y solar se diseña en [26], para su explotación renovable en climatización, sin provocar alteraciones ambientales en el subsuelo ni en el entorno. Con este trabajo, Tejedor pretende aprovechar las ventajas de cada una de las tecnologías del sistema híbrido para así conseguir una instalación más eficiente posible desde los puntos de vista económico, energético y ambiental. Para eso, se diseña un sistema de monitorización que recoger dato de los dispositivos y sistemas, además de diseñar un algoritmo para establecer las órdenes para la regulación y control del propio sistema. Se obtienen tres grandes conclusiones: (1) el modelo híbrido es más eficiente que el convencional desde el punto de vista energético; (2) conviene reducir las dimensiones del sistema para una menor inversión; (3) el análisis económico se ve afectado por el mantenimiento de los sistemas.

Barrella et. al [27] realizan un estudio de viabilidad de un calentador de agua con bomba de calor de aire centralizado y accionado eléctricamente para hacer frente a la pobreza energética en viviendas de bloque en Madrid (España). El objetivo principal del artículo es evaluar el rendimiento de una bomba de calor centralizada, de 200kW de capacidad de calefacción, para abastecer las necesidades de calefacción de un bloque de apartamentos en Madrid. La bomba de calor propuesta está accionada por un motor con velocidad de giro variable para modular la capacidad de calefacción de forma eficiente. También se ha contemplado una caldera de gas para satisfacer los picos de demanda, pero este aporte será casi nulo ya que se ha previsto que sea un 4% de la demanda abastecida. Como resultado, la tecnología propuesta se encuentra entre las medidas más prometedoras para abordar la pobreza energética en los hogares vulnerables.

Por otro lado, Wang et. al [28] desarrollan un método de diseño óptimo y validación experimental de un sistema híbrido de bomba de calor geotérmica con caldera de gas. El trabajo presenta principalmente el método de diseño de optimización del sistema híbrido de BC geotérmica con la caldera de fuente de gas auxiliar, y se desarrolla el software especial que incluye la interfaz de software, los algoritmos internos y el análisis de resultados. Se utiliza Visual Studio 2010 como plataforma de desarrollo, y el software de diseño visual fue compilado por el lenguaje de programación VC ++. El análisis de las cargas del edificio, el método de control de la caldera de gas, el análisis económico del sistema híbrido de bomba de calor geotérmica y el diseño y simulación del sistema híbrido de bomba de calor geotérmica con caldera de gas se basan en el software de diseño de bombas de calor



geotérmicas "geothermal star". Por último, la fiabilidad y la estabilidad del sistema se analizan mediante cálculo teórico. Los resultados demuestran que las calderas de gas pueden reducir eficazmente la carga máxima de la bomba de calor geotérmica y, por tanto, reducir la longitud diseñada de la tubería enterrada, resolver el problema del desequilibrio térmico subterráneo y mejorar la eficiencia de la unidad.

La influencia de la estrategia de dimensionamiento y las reglas de control en el potencial de ahorro energético de los sistemas híbridos de bomba de calor en un edificio residencial la estudian Dongellini et. al en [29]. El objetivo es determinar la importancia del dimensionamiento y de las reglas de control del sistema híbrido entre bomba de calor aerotérmica y caldera de gas natural. Para ello, se realiza una serie de simulaciones dinámicas para calcular el rendimiento estacional de los sistemas híbridos basados en una bomba de calor aerotérmica y evaluar la configuración óptima del sistema. Los resultados señalan que el rendimiento energético de estos sistemas depende en gran medida del dimensionamiento de la bomba de calor, de la tipología del dispositivo de apoyo y del algoritmo de control utilizado para la activación de los generadores de calor. Se demuestra que la adopción de sistemas híbridos en los que la bomba de calor se acopla a una caldera de gas permite obtener ahorros relevantes de energía primaria.

Udovichenko y Zhong [30] aplican la tecnología de bombas de calor alimentadas or aire (ASHP) para edificios residenciales en Canadá. La finalidad es explorar la viabilidad de implantar una tecnología híbrida de bomba de calor aerotérmica y caldera de gas natural y compararla con un sistema convencional de solo caldera de gas natural en tres ciudades canadienses. Para llevar a cabo este estudio se generó un prototipo experimental de un edificio residencial con un sistema de calefacción híbrido para el cálculo de la carga de esta. El análisis teórico incluyó la determinación de la tasa de pérdida de calor dependiente de la temperatura exterior de la residencia y la tasa de suministro de calor de la bomba de calor aerotérmica. Los resultados logrados en el modelo de construcción demuestran que el modelo creado es útil para otros análisis y que el sistema híbrido depende en gran medida de la región en la que se introduzca.

El rendimiento de un novedoso sistema híbrido de bomba de calor de doble fuente FV/Aire basado en un intercambiador de calor de tres fluidos se diseña y simula en [31] con la intención de conseguir una solución viable desde el punto de vista ambiental y eficiente para calefacción. El sistema se diseñó para proporcionar calefacción y electricidad a una casa rural unifamiliar de Pekín, y se desarrolló un modelo matemático. Los resultados del estudio indican que: (1) en comparación con una bomba de calor de aire convencional, el consumo de energía de este sistema a lo largo de la temporada de calefacción se reduce en un 13,1%; (2) para la generación de electricidad, en comparación con un panel fotovoltaico convencional, la producción de energía eléctrica aumenta en un 14,7%.

Wang et. al [32] realizan una revisión sistemática de los sistemas recientes de bomba de calor con fuente de aire (ASHP) asistidos por fuentes solares térmicas, fotovoltaicas y fotovoltaicas/térmicas. El estudio tiene la intención de evaluar el rendimiento de varios sistemas de bomba de calor aerotérmica a partir de fuentes solares, como son la solar térmica, la fotovoltaica y la híbrida entre estas dos.: Este trabajo realiza una revisión sistemática de los sistemas de bomba de calor aerotérmica asistidos por energía solar predominantes, incluyendo sus condiciones de contorno, configuraciones del sistema, indicadores de rendimiento, metodologías de investigación y rendimiento del sistema. Los resultados de la comparación realizada indican que el sistema híbrido entre fotovoltaica y



bomba de calor aerotérmica tienen el mejor rendimiento tecno-económico, con un COP de 3,75 aproximadamente.

5.3 Artículos relacionados con el diseño y dimensionamiento de instalaciones aerotérmicas

Guo, y Goumba [33] comparan el rendimiento entre instalaciones individuales y a escala de edificio de una bomba de calor aerotérmica. Por lo tanto, el objetivo principal es comparar los diferentes rendimientos que se engloban alrededor de la bomba de calor para ACS en instalaciones individuales (escala de apartamentos) y colectivas (escala de edificios con calderas centralizadas) en París. Así, se llevan a cabo diferentes simulaciones y se dimensionan las bombas de calor, los tanques de almacenamiento de agua y la distribución de ACS en los edificios/apartamento. Las simulaciones indican que el rendimiento total de las instalaciones individuales es mayor que el de las colectivas, ya que las individuales no tienen ninguna bomba de circulación. Pero, debido al menor sobredimensionamiento la instalación centralizada presenta un mejor comportamiento. En lo que sí que coinciden las dos instalaciones es en que reducen los gases de efecto invernadero (GEI) 6/7 veces.

El funcionamiento de una bomba de calor aerotérmica en una vivienda mediante la modelización de la información del edificio se analiza por Torregrosa-Jaime et. al [34]. El objetivo de este trabajo es implementar el modelo de una bomba de calor aire-agua reversible en EnergyPlus 8.9. El modelo se emplea para analizar el rendimiento de un sistema de bomba de calor aerotérmica (B) en un edificio residencial bajo diferentes climas españoles en comparación con un sistema convencional de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (A). Con el sistema B se consigue un importante ahorro de energía primaria en comparación con el sistema A y este ahorro de energía es mayor en climas con una importante demanda de calefacción.

La relación óptima del volumen del cilindro del compresor para los sistemas de bomba de calor con fuente de aire de compresión de dos etapas se estudia por Jiang et. al [35]. El objetivo principal de este artículo es determinar el ratio de volumen específico para los compresores de sistemas de bomba de calor aerotérmica. Para determinar ese ratio de compresión se han basado en datos meteorológicos de ocho ciudades típicas del norte de China donde el clima es frío y en un enfoque de optimización en dos etapas. Los resultados muestran que para las temperaturas mínimas de entre -4°C y -8°C el ratio de volumen adecuado es de entre 2 y 2.1, aumentando el COP un 10.3% para el ratio de volumen de 2 y un 17.6% para uno de 3.

Dongellini et. al [36] analizan los efectos del tamaño en el rendimiento energético de las bombas de calor reversibles alimentadas por aire para edificios de oficinas. El objetivo de este estudio es poner de manifiesto de qué manera el consumo de energía de estos sistemas se ve influido por la capacidad de modulación de la bomba de calor, el tamaño de la bomba de calor y el clima. Para ello se sigue un modelo numérico basado en el método bin y en el procedimiento de la firma energética, capaz de tener en cuenta el rendimiento de la bomba de calor a carga parcial, para calcular el rendimiento estacional y anual del sistema de climatización acoplado a un edificio de oficinas típico, situado en Frankfurt, Estambul y Lisboa. Para ello se han considerado diferentes tipos de bombas de calor (monocompresor on-off, multicompresor y bombas de calor con inversor). Los resultados señalan que el dimensionamiento de la bomba de calor afecta en gran medida al consumo energético estacional y anual de la climatización: la relación entre la capacidad térmica total de la



bomba de calor y la carga máxima del edificio influye mucho en el rendimiento energético del sistema.

Una bomba de calor aerotérmica (ASHP) para la calefacción se analiza por Zang et. al [37] con el objetivo presentar los resultados obtenidos en una aplicación de una para calefacción en Harbin, la capital de provincia más fría de China, para determinar así si este tipo de bombas de calor se pueden usar para producir calor en regiones tan frías. Para eso, se ha llevado a cabo un análisis durante tres días fríos en los que se han analizado parámetros como el COP, temperaturas de calefacción logradas y características de congelación de la bomba de calor. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que las BC aerotérmicas pueden utilizarse para aplicaciones de calefacción en regiones frías. Sin embargo, la diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior debe mantenerse dentro de los 41°C para lograr un COP aceptable.

Fuentes-Bargues et. al [38] analizan la aerotermia como alternativa a la contribución solar para agua caliente sanitaria (ACS) en edificación terciaria. Este estudio presenta la viabilidad técnica, normativa y económica de la bomba de calor aerotérmica para la generación de ACS como alternativa a los captadores solares térmicos en el sector terciario. Así, se analizan durante tres días fríos en los que se han analizado parámetros como el COP, temperaturas de calefacción logradas y características de congelación de la bomba de calor. Los resultados muestran que las BC aerotérmicas pueden utilizarse para aplicaciones de calefacción en regiones frías. Sin embargo, la diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior debe mantenerse dentro de los 41°C para lograr un COP aceptable.

La revisión de los avances en el sistema de bomba de calor de fuente de aire por compresión de vapor en regiones frías se realiza por Zhang et. al [39], con el objetivo de presentar una actualización de los recientes avances en los sistemas de bomba de calor aerotérmica accionada por compresor de vapor aplicados en regiones frías. Para la revisión, los sistemas avanzados se clasifican en tres grandes tipos: sistemas de compresión de una etapa, de dos etapas y de varias etapas. Además, el sistema de compresión de doble etapa se divide, según el número de compresores y bucles separados, en sistemas de compresión de casi dos etapas, de dos etapas y en cascada. Se han analizado y resumido los rendimientos térmicos y las características de cada tipo de sistemas de compresión con diferentes fluidos de trabajo y configuraciones intermedias. Al mismo tiempo, se proponen varios problemas de estos sistemas avanzados que impiden su aplicación generalizada en regiones frías. Esta revisión concluye que, entre todos estos sistemas, el sistema de compresión de casi dos etapas, en el que se centran los estudios relacionados, muestra el mayor potencial tanto para los rendimientos de calefacción como para el coste inicial.

Otra revisión que se basa en la mejora de las unidades de bomba de calor de fuente de aire durante la congelación y la descongelación la hacen Song et. al [40], centrándose en la evolución de las investigaciones sobre el retraso de las heladas y la descongelación para las unidades bomba de calor aerotérmicas de los últimos 20 años. En primer lugar, se presentan 2 medidas de retardo de las heladas y 5 métodos de descongelación, seguidos de 6 métodos típicos de optimización del sistema durante la descongelación de ciclo inverso. A continuación, se presentan estrategias de control alternativas para iniciar y finalizar una operación de descongelación. Basándose en el análisis anterior, se identifican las lagunas existentes en los trabajos de investigación sobre el retraso de la helada y la descongelación, y finalmente se ofrecen recomendaciones según el punto de vista de los presentes autores. Los resultados descritos en la literatura demuestran que, teniendo en cuenta los valores globales de las 12 medidas anticongelantes enumeradas, son muy recomendables el



precalentamiento del aire de entrada con calor residual y el tratamiento de la superficie de las aletas con nuevos materiales.

También para China, Zhang et. al [41] analizan técnico-económicamente la bomba de calor aerotérmica. El objetivo es estudiar la viabilidad técnica y la aplicabilidad económica del modo de calefacción con bomba de calor aerotérmica de baja temperatura y compararlo con los sistemas de calefacción convencionales. Se establece un modelo matemático de análisis técnico y económico de diferentes modos de calefacción. Con el modelo matemático, se han comparado diferentes sistemas de calefacción con su consumo de energía primaria, sus emisiones contaminantes, su inversión inicial y su coste anual de funcionamiento. Los resultados mostraron que el sistema de calefacción por bomba de calor con fuente de aire a baja temperatura puede satisfacer de forma estable y fiable la demanda de calefacción de espacios en edificios residenciales cuando la temperatura del aire exterior es de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, además de ser una tecnología muy eficiente, baja en emisiones y barata.

A nivel experimental Zou et. al [42], analizan un calentador de agua con bomba de calor aerotérmica que utiliza agua-PCM para el almacenamiento de calor. Así, con el fin de aumentar la capacidad de almacenamiento de calor y mejorar el rendimiento del sistema, se diseña y estudia experimentalmente una bomba de calor aerotérmica con tanque de almacenamiento que utiliza agua y material de cambio de fase (PCM) aleteado para el almacenamiento de calor. Se comparan y discuten los rendimientos de la bomba de calor para la primera operación cuando el material de cambio de fase está en el almacenamiento de calor y la segunda operación cuando este está en la descarga de calor. Además, se compararon los rendimientos entre la bomba de calor que utiliza agua-PCM para el almacenamiento de calor y la bomba de calor convencional con tanque de agua estándar. Los resultados muestran que el volumen del tanque de almacenamiento aumenta poco, pero el almacenamiento de calor se incrementa en un 14%. Además, cuando el agua se calienta de 15 a $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, el primer tiempo de funcionamiento de la bomba de calor es casi el mismo que el tiempo de funcionamiento normal de la bomba de calor convencional, pero el segundo tiempo de funcionamiento se reduce en un 13%.

5.4 Artículos relacionados con el diseño y dimensionamiento de instalaciones geotérmicas

Niemelä et. al [43] ofrecen soluciones de renovación rentables para maximizar el rendimiento medioambiental, las condiciones térmicas interiores y la productividad de los edificios de oficinas en climas fríos. A lo largo del trabajo presentan soluciones de renovación óptimas en cuanto a costes y viabilidad económica de diferentes medidas de renovación. Este estudio también analiza las combinaciones óptimas de medidas de renovación. Como método se utilizó el análisis de optimización multiobjetivo basado en la simulación. El impacto medioambiental de las medidas de renovación se estudió mediante la evaluación de las emisiones de CO_2 del consumo de energía suministrado. Según los resultados, el concepto de sistema de producción de energía óptimo en cuanto a costes es un sistema de bomba de calor geotérmica utilizado para la calefacción y la refrigeración combinadas.

Una revisión de los sistemas de bombas de calor geotérmicas con tubos de calor para la eficiencia energética de los edificios la realiza Wu et al. [44], con sus recientes avances. En primer lugar, se presentan el proceso de funcionamiento y los principios de la bomba de calor geotérmica y los tubos de calor. También se presentan algunas investigaciones centradas en el diseño y la transformación del intercambiador de calor terrestre. Por último,



se describe en detalle la influencia de los distintos parámetros en el rendimiento de los tubos de calor geotérmicos. La conclusión general es que las bombas de calor geotérmicas con tubos de calor tienen un mejor rendimiento que las bombas de calor geotérmicas convencionales en edificios.

Los costes de los sistemas de bombas de calor geotérmicas se comparan con otras formas de calefacción y refrigeración para diferentes condiciones climáticas por Aditya et. al [45], ejemplificadas por las que se dan en toda Australia. Para hacer la comparación se han llevado a cabo cálculos de costes de capital y de funcionamiento de los sistemas convencionales y bombas de calor geotérmicas, teniendo en cuenta diferentes parámetros. Los resultados indican que el rendimiento comparativo de las bombas de calor geotérmicas depende de muchos parámetros, como las condiciones climáticas, las condiciones del suelo, los precios de las perforaciones y los precios de la electricidad y el gas en las regiones donde se instalan los sistemas.

Otra vez para un estudio de caso de Nanjing, China, Zhou et al. [46] evalúan el rendimiento y optimización tecno-económica de la bomba de calor geotérmica (GSHP) para la calefacción y la refrigeración residencial. Para ello, se desarrollan modelos numéricos y económicos con la intención de analizar la eficiencia térmica y económica de las GSHP residenciales, así como utilizado diferentes métodos y obtención de parámetros para llevar a cabo este estudio. Los resultados revelan que la superioridad de la GSHP individual puede mantenerse en la gran mayoría del tiempo y las inversiones de capital son relativamente altas dentro del rango de 13034,4 a 18199,2 CNY (Yuan chino).

5.5 Consideraciones del estado del arte

Como se ha visto, se ha realizado una revisión exhaustiva de los trabajos vinculados a las bombas de calor en edificación los últimos 3 años. También se comprueba que muchos de los artículos se relacionan con casos de estudio de Asia Oriental y unos pocos con casos de la UE. Se han repasado los artículos relacionados con la rehabilitación de sistemas térmicos de con BC, así como los sistemas híbridos de BC con recursos renovables. Considerando que las opciones más prácticas de diseño son las BC geotérmicas y aerotérmicas, también se repasan las últimas actualizaciones en la bibliografía. La conclusión de esta revisión es sencillamente que, aunque gran parte del contenido de los artículos analizados sea beneficioso o necesario, ninguno de ellos incorpora una BC en edificios de oficinas del País Vasco, teniendo en cuenta las condiciones técnicas, el consumo o las condiciones bioclimáticas, entre otros.

6 ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO

6.1 Descripción de la instalación actual

El Departamento de Planificación Territorial, Vivienda y Transportes del Gobierno Vasco cuenta con un Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación (LCCE), que ensaya las propiedades de diferentes productos y sistemas constructivos. Su objetivo es innovar, crear y promover nuevas áreas tecnológicas, con el fin de potenciar y mejorar la calidad y sostenibilidad de los edificios en la región. Se divide en tres áreas principales, cada una de ellas vinculada a un propósito específico relacionado con el control y la calidad de los elementos constructivos de los edificios residenciales, así como de otros usos. Estas áreas son: Materiales, Acústica y Térmica.

El grupo de investigación ENEDI de la Universidad del País Vasco desarrolla el Área Térmica del LCCE contribuyendo a la mejora de la eficiencia energética en edificios nuevos y rehabilitados, así como a la promoción del uso de energías renovables; a través de ensayos experimentales, actividades de investigación, formación y asesoramiento a la sociedad sobre el comportamiento energético y la salud en los edificios.

El LCCE consta de tres edificios: (1) El edificio principal (en adelante Main.B), (2) el laboratorio físico-mecánico-químico (en adelante PMC.Lab) y (3) el laboratorio de instalaciones térmicas, como se muestra en la Figura 6.1.



Figura 6.1. Foto frontal y aérea del LCCE

A efectos de la auditoría energética, realizada con ayuda de Soningeo S.L., sólo se evalúan los dos primeros edificios (Main.B y PMC.Lab). En realidad, sólo se acondiciona una parte de ellos, es decir, las oficinas y las zonas de laboratorio, ya que los grandes pabellones de los componentes de la construcción no tienen apenas necesidades energéticas. Por lo tanto, este estudio sólo se centrará en el consumo de energía y el suministro de energía en estas partes del edificio.

6.1.1 Características del edificio principal

Este edificio se construyó en el año 1986, y en total tiene una superficie de 3.183 m², de los cuales 1.338 m² están acondicionados. La envolvente térmica tiene las siguientes características térmicas:

- La fachada tiene aislamiento térmico y paredes de ladrillo con cámara de aire.
- La cubierta es plana con aislamiento.



- Los huecos son de doble acristalamiento con marcos de aluminio con rotura de puente térmico y protecciones solares interiores en la orientación sur.

6.1.2 *Características del edificio PMC.Lab*

Este edificio fue construido en 1973 y tiene 348 m² de superficie, de los cuales la totalidad de los 348 m² está aclimatada.

- La fachada es de muro de carga de hormigón sin aislamiento.
- El tejado es plano con aislamiento y acabado de grava.
- Los huecos son de cristal simple con carpintería de aluminio sin rotura de puente térmico y con protección solar exterior móvil mediante persianas.

6.1.3 *Demandas térmicas de calefacción y ACS en el edificio LCCE*

El horario de trabajo en los edificios del LCCE corresponde a edificios de oficinas que funcionan entre semana de lunes a jueves de 8:00 a 18:00 horas y los viernes de 8:00 a 15:00 horas. Los sistemas térmicos suministran el confort térmico establecido en la normativa. La ventilación es manual basada en la apertura de ventanas y no hay ventilación mecánica. En algunas oficinas hay sistemas de aire acondicionado split para proporcionar un confort local adicional, principalmente en verano. Por lo tanto:

- La calefacción se activa en los edificios Main.B y PMC.Lab, durante las horas de trabajo en la temporada de invierno, de noviembre a abril.
- El consumo de ACS sólo existe en el PMC.Lab, durante todo el año.
- Las unidades de aire acondicionado se activan en los edificios Main.B y PMC.Lab durante las horas de trabajo en la temporada de verano, de mayo a septiembre.

Los siguientes equipos terminales cubren las necesidades de calefacción y refrigeración del LCCE:

- Radiadores, la mayoría de ellos con válvulas termostáticas.
- Sistemas de expansión directa tipo split que funcionan de forma autónoma con control del usuario.
- Fancoils que se regulan a través de válvulas de tres vías situadas en el circuito de calefacción, y que actúan en función de la lectura de la sonda de temperatura situada en la sala.

Estas necesidades térmicas son abastecidas por dos sistemas térmicos principales, uno en el edificio Main.B y otro en el edificio PMC.Lab, con las siguientes características:

La sala de calderas de la Main.B, instalada en 1990 (Figura 6.2), consta de una caldera



Figura 6.2. Foto de la caldera estandar

estándar con una potencia nominal de 216 kW (y un rendimiento nominal del 86 %) que da servicio de calefacción a los radiadores y fancoils de la Main.B.

La sala de calderas del PMC.Lab, que también data de 1990, consta de una caldera de baja temperatura de dos etapas con una potencia nominal de 44,2 kW (y un rendimiento de combustión del 89,7%), que da servicio de calefacción y ACS a los radiadores y al depósito de 150 l del edificio del PMC.Lab.

El combustible utilizado por las calderas es gas natural.

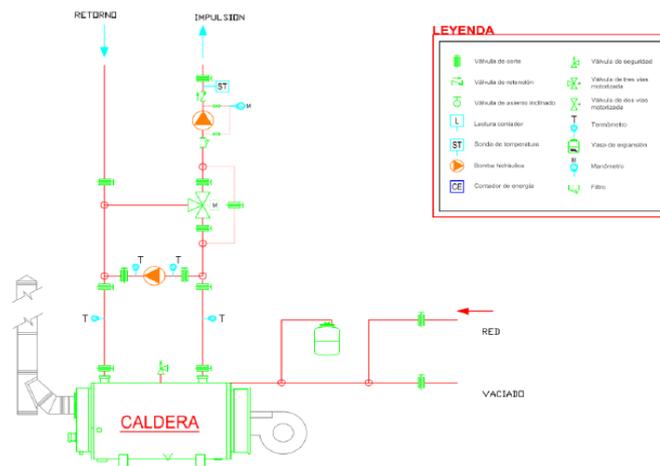


Figura 6.3. Esquema de principio de la caldera del Main.B

Los esquemas de principio de las dos calderas son los que se pueden ver en la Figura 6.3 y Figura 6.4, donde se distingue el depósito de 150 l que se utiliza para abastecer las demandas de ACS en el PMC.Lab.

6.2 Descripción de las BC escogidas para el análisis

Después de un análisis exhaustivo del mercado de BC se han optado las siguientes opciones para realizar tanto el estudio geotérmico como el aerotérmico:

- Geotermia
 - Carrier 61WG-040
 - Carrier 61WG-240
- Aerotermia
 - Tecna Black HT 65
 - Tecna Black HT 200

Las razones por las que se ha decidido utilizar estos modelos son, entre otras, las características de las propias BC que se presentan en la Tabla 6.1, su buena relación calidad/precio, y la cantidad de información que aportan sus fabricantes en los catálogos, además de por las demandas de los propios edificios del LCCE.

Tabla 6.1. Características de las bombas de calor elegidas

Bomba de calor 1	
Marca	Carrier
Modelo	61WG-040
Capacidad calorífica nominal (kW)	49
COP	4,32
Peso (kg)	212
Ancho x Largo x Alto (mm)	600 x 1044 x 901
Compresor	Scroll hermético 48,3 r/s
Evaporador	Intercambiador de calor de placas
Condensador	Intercambiador de calor de placas
Refrigerante	R410A
Bomba de calor 2	
Marca	Carrier
Modelo	61WG-140
Capacidad calorífica nominal (kW)	168
COP	4,55
Peso (kg)	758
Ancho x Largo x Alto (mm)	880 x 1583 x 1574
Compresor	Scroll hermético 48,3 r/s
Evaporador	Intercambiador de calor de placas
Condensador	Intercambiador de calor de placas
Refrigerante	R410A
Bomba de calor 3	
Marca	Tecna
Modelo	Black HT 65
Capacidad calorífica nominal (kW)	59,2
COP	3,44
Peso (kg)	648
Ancho x Largo x Alto (mm)	1408 x 1208 x 2390
Ventilador	Axial
Compresor	Alternativo

Evaporador	Intercambiador de calor de placas
Condensador	Intercambiador de calor de placas
Refrigerante	R134A
Bomba de calor 4	
Marca	Tecna
Modelo	Black HT 200
Capacidad calorífica nominal (kW)	202,3
COP	3,29
Peso (kg)	2099
Ancho x Largo x Alto (mm)	5330 x 1208 x 1912
Ventilador	Axial
Compresor	Alternativo
Evaporador	Intercambiador de calor de placas
Condensador	Intercambiador de calor de placas
Refrigerante	R134A

Por un lado, el precio de las BC geotérmicas se ha conseguido a través del catálogo de tarifas; por otro lado, el precio de las BC aerotérmicas se ha obtenido mediante un análisis económico del mercado, ya que muchas BC aerotérmicas de alta potencia calorífica no disponen de precios fijos. En el análisis económico se puede ver que las BC de entre 4 y 75 kW mantienen el valor de más o menos 450 €/kW, pero como sucede en muchas tecnologías, ese valor disminuye cuanto mayor es la potencia de las máquinas. Por ello, se ha supuesto que a partir de BC de 75 kW el valor baja hasta en torno a 350€/kW. Todo esto se puede ver claramente en la Figura 6.5.

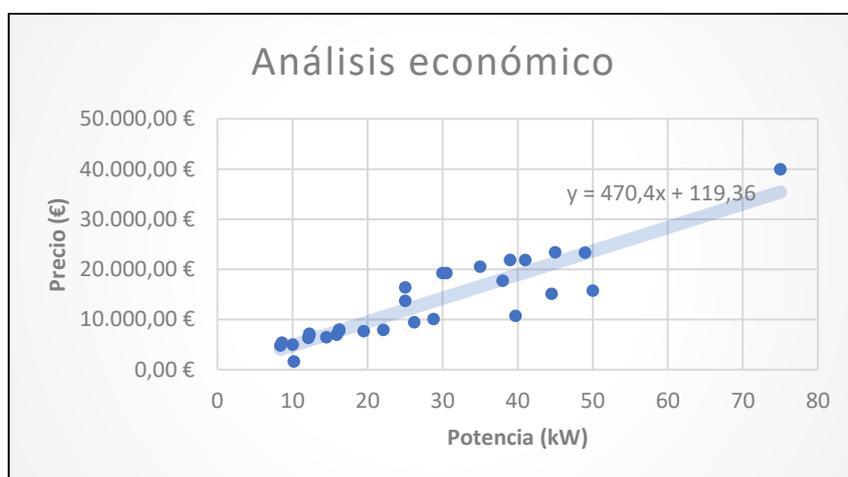


Figura 6.5. Análisis económico BC aerotérmicas

Por lo tanto, los precios de las BC serían los siguientes:

Tabla 6.2. Precios de las BC del estudio

Bomba de calor	Precio (€)
Carrier 61WG-040	9.999,00 €
Carrier 61WG-140	18.600,00 €
Tecna Black HT 65	30.772,00

Tecna Black HT 200	70.000,00 €
---------------------------	-------------

6.3 Análisis geotérmico

Primeramente, se ha realizado un análisis geotérmico para ver si la implantación de la BC geotérmica es viable en los edificios del LCCE. Para ello, se ha seguido estrictamente el procedimiento de diseño de un intercambiador enterrado que propone IDAE en su guía técnica “Diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado” publicado en el año 2012 61[47].

El análisis se realiza para dos edificios diferentes, y, por lo tanto, se estudian dos bombas de calor; así, los apartados o pasos que se han seguido se han duplicado

6.3.1 *Elección de las bombas de calor*

Como se ha mencionado en el apartado 6.2 las bombas de calor utilizadas serán la Carrier 61WG-040 y la Carrier 61WG-140 cuyas características más importantes se enlistan en la Tabla 6.1.

6.3.2 *Elección del fluido circulante*

Como fluido que circula por el intercambiador de calor se ha elegido utilizar solamente agua que tiene las siguientes propiedades entre las diferentes opciones que había:

	Agua	Etilenglicol	Propilenglicol
Densidad a 20 °C (g/cm ³)	1	0,9259	0,8630
Punto congelación °C (30% volumen)	0	-13	-12
Punto ebullición °C	100	197	187
Calor Específico a 15 °C (kJ/Kg.K)	4,187	2,185	2,50371
Viscosidad a 0 °C (Pa.s) ·10 ⁻³	1,79	57,4	243
Viscosidad a 20 °C (Pa.s) ·10 ⁻³	1,01	20,9	60,5
Viscosidad a 40 °C (Pa.s) ·10 ⁻³	0,655	9,5	18,0
Conductividad térmica a 20 °C (kW/m.K) ·10 ⁻³	0,60	0,26	0,20

Figura 6.6. Características físicas de los fluidos caloportadores

6.3.3 *Elección de la configuración a emplear*

La configuración elegida ha sido la vertical debido a la falta de espacio utilizable en el recinto del LCCE y sería en serie para poder captar al máximo el calor cuando haya mucha demanda de calefacción en el interior. Figura 6.7

6.3.4 *Elección del tubo*

Para esta instalación se ha decidido utilizar la sonda geotérmica PE 100-RC de la empresa ALB GEotherm que tiene las siguientes características, las cuales se han utilizado para determinar varios parámetros del diseño de la instalación complete como la resistencia del tubo (Rp), caudal e incluso configuración de los hoyos:

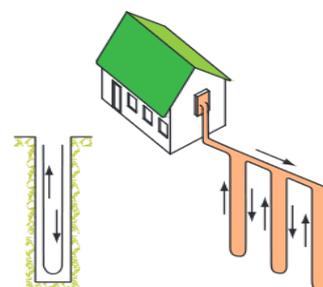


Figura 6.7. Sistema en serie vertical



$\rho=0,96 \text{ g/cm}^3; \varepsilon=0,01\text{mm}; k_p=0,42 \text{ W/m}\cdot\text{K};$ $D_0=0,0378\text{m}; D_1=0,032\text{m}; H=100\text{m};$ $L=200\text{m}; P_{\text{nom}}=16\text{bar}$
--

6.3.5 Dimensionamiento del intercambiador de calor enterrado

El intercambio de calor será entre el terreno y el agua o fluido que circule por el tubo intercambiador, por lo tanto, en primer lugar, hay que determinar las temperaturas máximas y mínimas tanto del terreno como del fluido.

6.3.5.1 Determinar la temperatura máxima y mínima del terreno

En este caso, las fórmulas a utilizar son las siguientes:

$$T_L(z) = T_m - A_s \cdot e^{(-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot \alpha}})} \quad (7)$$

$$T_H(z) = T_m + A_s \cdot e^{(-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot \alpha}})} \quad (8)$$

Como el intercambiador propuesto es un intercambiador vertical (de más de 10 m de profundidad), el termino que suma o resta en cualquiera de los dos casos a la temperatura media anual del entorno es cero, la temperatura máxima y la mínima serán iguales y su valor será el de la temperatura media anual, que, según el Instituto Nacional de Meteorología de España [48], es de 11,54°C.

6.3.5.2 Determinar las temperaturas máximas y mínimas de entrada del fluido a la bomba de calor

En este apartado se tiene que analizar cada BC por su parte:

- Main.B

La BC del edificio Main.B tiene las siguientes características:

- Pot bomba calor calefacción (P_C): 168 kW
- COP: 4,55
- Caudal (Q): 20000 l/h
- Rango $T_{\text{entrada,C}}$ [9-12]°C
- C_p del fluido (agua) 4185 J/kg·K

Con estos datos, la temperatura de salida es la siguiente:

$$T_{\text{salida,C}} = T_{\text{entrada,C}} - \frac{1000 \cdot P_C \cdot \frac{COP - 1}{COP}}{C_p \cdot (Q/3600)} \quad (9)$$

$T_{\text{salida,C}} = 6,36 \text{ }^\circ\text{C}$

Por lo tanto, la temperatura mínima de entrada es:

$$T_{MIN} = 0,5 \cdot (12 + 6,36) = 9,18 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (10)$$

- PMC.Lab

La BC del edificio PMC.Lab tiene las siguientes características:

- Pot bomba calor calefacción (P_C): 49 kW
- COP: 4,32
- Caudal (Q): 10000 l/h
- Rango $T_{entrada,C}$ [9-12] $^{\circ}\text{C}$
- C_p del fluido (agua) 4185 J/kg·K

La temperatura de salida es:

$$T_{salida,C} = T_{entrada,C} - \frac{1000 \cdot P_C \cdot \frac{COP - 1}{COP}}{C_p \cdot (Q/3600)} \quad (11)$$

$T_{salida,C} = 8,76 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Por lo tanto, la temperatura mínima de entrada es:

$$T_{MIN} = 0,5 \cdot (12 + 8,76) = 10,38 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (12)$$

6.3.5.3 Calcular la resistencia de los tubos al flujo de calor

La resistencia térmica que tiene el tubo respecto al flujo de calor se calcula con la siguiente fórmula:

$$R_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot k_p} \cdot \ln\left(\frac{D_0}{D_1}\right) \quad (13)$$

Con los datos mencionados en el apartado 6.3.4, la resistencia tiene un valor de $R_p=0,063121 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$.

6.3.5.4 Calcular la resistencia térmica de los intercambiadores y el factor de utilización

Este cálculo es algo más complejo que todos los anteriores, ya que son necesarios datos climáticos específicos del emplazamiento.

Primeramente, hay que tener todos los datos de temperatura horarios de un año completo, o de la época de calefacción del edificio. En este caso, se han cogido todos los datos reales hora a hora del año 2019, obtenidos a través de la auditoría de Soningeo [50], donde se



muestra que estando la caldera en funcionamiento únicamente los meses de noviembre a abril, la instalación está sobredimensionada. Con eso y teniendo en cuenta que cuando la temperatura exterior sea menor que 15 °C se pondrá en marcha la bomba de calor, se obtienen 43.400,39 grados día/año (GD).

Sabiendo esto, el proceso hay que repetirlo dos veces, una con el edificio Main.B y otra con el PMC.Lab.

Empezando con el Main.B, una vez sabidos los GD que hay en Vitoria Gasteiz, son necesarios los siguientes datos:

- horas en marcha
- horas en las que la temperatura del aire exterior se encuentra dentro de un intervalo de temperaturas (bin hours)
- la fracción de marcha, que es el ratio entre la carga necesaria para calentar el edificio dependiendo de la temperatura exterior y la potencia nominal de la BC, elegida a partir de la temperatura mínima histórica de Vitoria Gasteiz con un percentil del 99
- la demanda de calefacción de referencia para ese lugar que recomienda el documento “Escala de calificación energética para edificios existentes” de IDAE [51]. Estos datos son necesarios para obtener el factor de utilización (Fh) de la BC.

La Tabla 6.3 muestra los datos necesarios y el factor de utilización:

Tabla 6.3. Datos necesarios para calcular el Fh del Main.B

Rangos de T ^a (°C)		Tref (°C)	Carga (kW)	Qhp (kW)	Fracción de marcha	Bin hours (h)	Horas en marcha (h)
-22	-21	-21,5	343,5924	168	1	0	0
-21	-20	-20,5	334,1788	168	1	0	0
-20	-19	-19,5	324,7652	168	1	0	0
-19	-18	-18,5	315,3516	168	1	0	0
-18	-17	-17,5	305,938	168	1	0	0
-17	-16	-16,5	296,5244	168	1	0	0
-16	-15	-15,5	287,1108	168	1	0	0
-15	-14	-14,5	277,6972	168	1	0	0
-14	-13	-13,5	268,2836	168	1	0	0
-13	-12	-12,5	258,87	168	1	0	0
-12	-11	-11,5	249,4564	168	1	0	0
-11	-10	-10,5	240,0428	168	1	0	0
-10	-9	-9,5	230,6292	168	1	0	0
-9	-8	-8,5	221,2156	168	1	0	0
-8	-7	-7,5	211,802	168	1	0	0
-7	-6	-6,5	202,3884	168	1	0	0
-6	-5	-5,5	192,9748	168	1	0	0
-5	-4	-4,5	183,5612	168	1	3	3
-4	-3	-3,5	174,1476	168	1	4	4
-3	-2	-2,5	164,734	168	0,98055952	14	13,72783333
-2	-1	-1,5	155,3204	168	0,92452619	49	45,30178333
-1	0	-0,5	145,9068	168	0,86849286	99	85,98079286
0	1	0,5	136,4932	168	0,81245952	164	133,2433619
1	2	1,5	127,0796	168	0,75642619	234	177,0037286
2	3	2,5	117,666	168	0,70039286	298	208,7170714
3	4	3,5	108,2524	168	0,64435952	354	228,1032714



4	5	4,5	98,8388	168	0,58832619	389	228,8588881
5	6	5,5	89,4252	168	0,53229286	485	258,1620357
6	7	6,5	80,0116	168	0,47625952	488	232,4146476
7	8	7,5	70,598	168	0,42022619	469	197,0860833
8	9	8,5	61,1844	168	0,36419286	471	171,5348357
9	10	9,5	51,7708	168	0,30815952	484	149,1492095
10	11	10,5	42,3572	168	0,25212619	407	102,6153595
11	12	11,5	32,9436	168	0,19609286	427	83,73165
12	13	12,5	23,53	168	0,14005952	440	61,62619048
13	14	13,5	14,1164	168	0,08402619	432	36,29931429
14	15	14,5	4,7028	168	0,02799286	393	11,00119286
TOTAL HORAS						6104	2431,5

El factor de utilización (Fh) es el ratio entre las horas en marcha y las bin hours, con un resultado de 0,3984; lo que demuestra el sobredimensionamiento de la instalación.

Una vez obtenido el valor del Fh, se analiza el terreno del LCCE. Según el Instituto Geológico y Minero de España [49], el LCCE se sitúa sobre un suelo de caliza arcillosa, que tiene una conductividad térmica entre 2,1 y 2,8 W/m·K. A 2,4 W/m·K tiene una difusividad de 0,0036 m²/h.

La resistencia térmica del intercambiador (Rs) se calcula en función de la posición de los pozos, que pueden estar en las esquinas, en los laterales y/o en el centro. La configuración y la cantidad de pozos se escoge en función de la longitud del intercambiador calculada con la fórmula (15).

$$R_s = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot k_s} \cdot \left| E_i\left(\frac{-r^2}{4\alpha t}\right) \right| \quad (14)$$

$$L = \frac{P_c \cdot \frac{COP - 1}{COP} \cdot (R_p + R_s \cdot F_h)}{T_{L,S} - T_{min,BC}} \quad (15)$$

En este caso la configuración requerida es la de 8x8 como se puede ver en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4. Configuración requerida para la BC del edificio Main.B

Main.B				
Configuración	Hoyos	Rs	Longitud	Número de hoyos
1x1	1	0,296769	5234,6258	26,173129
2x2	4	0,811236	11150,486	55,752432
3x3	9	0,857072	11677,561	58,387803
3x4	12	0,869084	11815,684	59,078422
4x4	16	0,881649	11960,163	59,800817
5x5	25	0,896925	12135,826	60,679131
6x6	36	0,90733	12255,477	61,277383
7x7	49	0,914871	12342,187	61,710933
8x8	64	0,920585	12407,9	62,039499



En consecuencia, la configuración 8x8 es:

Tabla 6.5. Datos reales del intercambiador de la BC geotérmica del edificio Main.B

Configuración	Hoyos	Rs	Longitud real (m)	Distancia entre hoyos (m)
8x8	64	0,92059	12800	6

Se hace lo mismo en el edificio PMC.Lab, donde el factor Fh es de 0,3556:

Tabla 6.6. Datos necesarios para calcular el Fh del PMC.Lab

Rangos de T ^a (°C)		Tref (°C)	Carga (kW)	Qhp (kW)	Fracción de marcha	Horas (h)	Horas en marcha (h)
-22	-21	-21,5	89,4323	49	1	0	0
-21	-20	-20,5	86,9821	49	1	0	0
-20	-19	-19,5	84,5319	49	1	0	0
-19	-18	-18,5	82,0817	49	1	0	0
-18	-17	-17,5	79,6315	49	1	0	0
-17	-16	-16,5	77,1813	49	1	0	0
-16	-15	-15,5	74,7311	49	1	0	0
-15	-14	-14,5	72,2809	49	1	0	0
-14	-13	-13,5	69,8307	49	1	0	0
-13	-12	-12,5	67,3805	49	1	0	0
-12	-11	-11,5	64,9303	49	1	0	0
-11	-10	-10,5	62,4801	49	1	0	0
-10	-9	-9,5	60,0299	49	1	0	0
-9	-8	-8,5	57,5797	49	1	0	0
-8	-7	-7,5	55,1295	49	1	0	0
-7	-6	-6,5	52,6793	49	1	0	0
-6	-5	-5,5	50,2291	49	1	0	0
-5	-4	-4,5	47,7789	49	0,975079592	3	2,925238776
-4	-3	-3,5	45,3287	49	0,92507551	4	3,700302041
-3	-2	-2,5	42,8785	49	0,87507143	14	12,251
-2	-1	-1,5	40,4283	49	0,82506735	49	40,4283
-1	0	-0,5	37,9781	49	0,77506327	99	76,73126327
0	1	0,5	35,5279	49	0,72505918	164	118,9097061
1	2	1,5	33,0777	49	0,67505510	234	157,9628939
2	3	2,5	30,6275	49	0,62505102	298	186,2652041
3	4	3,5	28,1773	49	0,57504694	354	203,5666163
4	5	4,5	25,7271	49	0,52504286	389	204,2416714
5	6	5,5	23,2769	49	0,47503878	485	230,3938061
6	7	6,5	20,8267	49	0,42503469	488	207,4169306
7	8	7,5	18,3765	49	0,37503061	469	175,8893571
8	9	8,5	15,9263	49	0,32502653	471	153,0874959
9	10	9,5	13,4761	49	0,27502245	484	133,1108653
10	11	10,5	11,0259	49	0,22501837	407	91,58247551

11	12	11,5	8,5757	49	0,17501429	427	74,7311
12	13	12,5	6,1255	49	0,12501020	440	55,0044898
13	14	13,5	3,6753	49	0,07500612	432	32,4026449
14	15	14,5	1,2251	49	0,02500204	393	9,825802041
TOTAL HORAS						6104	2170,427163

Y, la resistencia del intercambiador y la configuración escogida es:

Tabla 6.7. Configuración requerida para la BC del edificio PMC.Lab

PMC.Lab				
Configuración	Hoyos	Rs	Longitud	Número de hoyos
1x1	1	0,296769	1398,5812	6,992906
2x2	4	0,811236	2915,6414	14,578207
3x3	9	0,857072	3050,804	15,254020
3x4	12	0,869084	3086,2244	15,431122
4x4	16	0,881649	3123,2746	15,616373
5x5	25	0,896925	3168,3214	15,841607
6x6	36	0,90733	3199,0045	15,995023
7x7	49	0,914871	3221,2404	16,106202
8x8	64	0,920585	3238,0918	16,190459

Tabla 6.8. Datos reales del intercambiador de la BC geotérmica del edificio PMC.Lab

Configuración	Hoyos	Rs	Longitud real (m)	Distancia entre hoyos (m)
4x4	16	0,88165	3200	6

Este análisis indica que para la bomba de calor del edificio Main.B hacen falta por lo menos 2304 m², y que para el edificio PMC.Lab hacen falta otros 576 m², como mínimo. Si se atiende a la parcela que posee el edificio LCCE se puede ver que sin hacer la obra debajo de los propios edificios (opción que no es viable) es imposible realizar una obra con tanta superficie, por lo que se puede decir que la opción de implantar BC geotérmicas en el edificio LCCE es muy poco viable por la parte logística. En próximos apartados se analizará esta opción para ver si económicamente es viable o no realizar el cambio de tecnología de calderas estándares a BC geotérmicas.

6.4 Análisis aerotérmico sin caldera de apoyo

Para el análisis aerotérmico sin caldera de apoyo, el primer paso es saber cuál es la carga máxima que va a necesitar en cada uno de los edificios para poder dimensionar las BC que consigan abastecer las demandas completas de los edificios. Para determinar esa carga o demanda máxima se tienen que analizar los datos meteorológicos del lugar, concretamente los datos de la temperatura media horaria, que se consiguen a través de la herramienta PVGIS [52]. Una vez obtenidos los GD o grados día del lugar (teniendo de referencia una temperatura base de 15°C) hay que multiplicarlos por la suma de las pérdidas por

cerramientos y ventilación de los edificios, considerando la superficie de los cerramientos completos de cada edificio. Así se obtienen las demandas de los diferentes edificios, aunque en este caso, por falta de datos, se ha supuesto un coeficiente de transmitancia de $3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ en los dos edificios (Main.B y PMC.Lab) como suma de pérdidas por fachada y ventilación. Así pues, las pérdidas térmicas en el edificio Main.B serían de $9430,66 \text{ W/K}$ y en el edificio PMC.Lab de $2801,53 \text{ W/K}$.

Las demandas térmicas se calculan cada hora durante todo el año, pero, por simplificar el proceso y para compararlo con los datos de producción eléctrica de la planta fotovoltaica instalada en el tejado de los edificios del LCCE, se ha simplificado en días tipo de cada mes cogiendo la temperatura media horaria de todos los días de cada mes. Esa simplificación supone un error asumible en los cálculos respecto a la realidad, pero el factor de corrección de cada mes se ha tenido en cuenta a la hora de calcular el consumo eléctrico de las BC.

Además, desde el LCCE se ha propuesto que los elementos terminales (radiadores, fancoils...) no se cambien. Como ya se sabe, las calderas del LCCE tienen unas horas de funcionamiento establecidas para trabajar de 8:00 a 18:00 a unos $70\text{-}80^\circ\text{C}$, pero las bombas de calor solo podrán elevar la temperatura del circuito hidráulico a $40\text{-}45^\circ\text{C}$, por lo tanto deberán funcionar durante las 24 horas del día, porque en la auditoría del LCCE [50] se ha comprobado que el confort térmico se mantiene si los radiadores trabajan a $40\text{-}45^\circ\text{C}$ durante las 24 horas del día. Esto supondrá un sobreconsumo en las BC, ya que si los elementos terminales estuviesen preparados para trabajar óptimamente a $40\text{-}45^\circ\text{C}$ las horas de funcionamiento tendrían que ser menores, y en este caso se está teniendo en cuenta el consumo del día completo para abastecer las demandas térmicas de todo el día, aunque por las noches no haya nadie en el edificio.

En los gráficos de las demandas del día tipo de cada mes se puede ver que el mes de mayor demanda de calefacción tanto en el edificio Main.B como en el PMC.Lab es en el mes de enero, Figura 6.8. Aun así, la demanda máxima se registra en el mes de febrero, que en el edificio Main.B es de $130,39 \text{ kWh}$, y del edificio PMC.Lab es de $38,74 \text{ kWh}$.

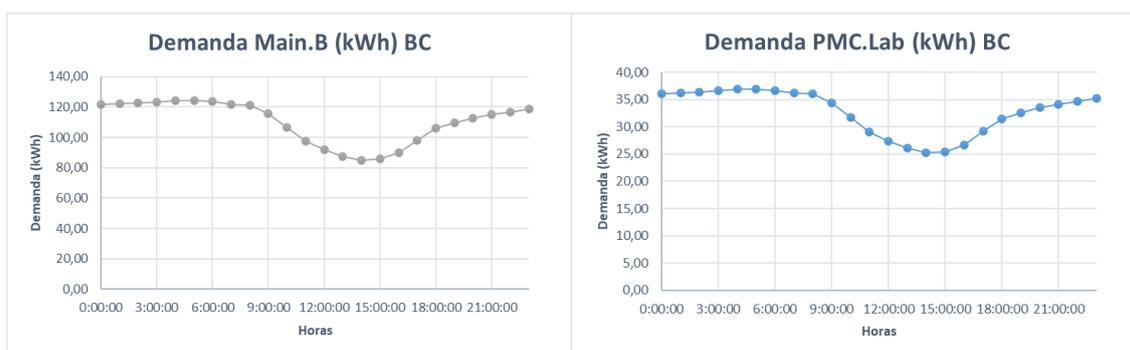


Figura 6.8. Demanda de calefacción en LCCE el mes de enero

Por lo tanto, conociendo la demanda máxima en un periodo de una hora, se puede dimensionar la bomba de calor para abastecer esa demanda térmica. En el caso del edificio Main.B se ha optado por la BC Tecna Black HT 200, y en el del edificio PMC.Lab por la BC Tecna Black HT 65.

A diferencia de las BC geotérmicas, las BC aerotérmicas dependen completamente de la temperatura exterior, por lo que los catálogos de las BC anteriormente comentadas aportan los diferentes valores de potencia absorbida por el compresor, potencia calorífica nominal

y COP para las diferentes temperaturas exteriores, como se puede ver en la Figura 6.9 y en la Figura 6.10.

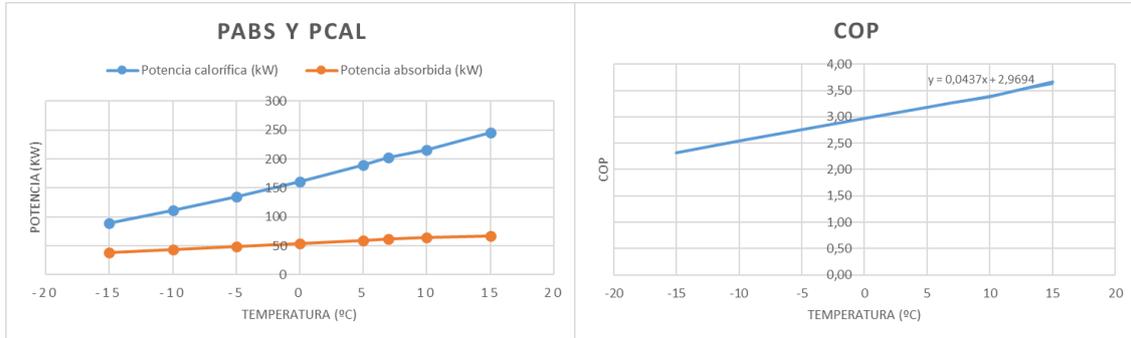


Figura 6.10. Potencia absorbida, potencia calorífica y COP en función de la temperatura exterior de la BC Main.B

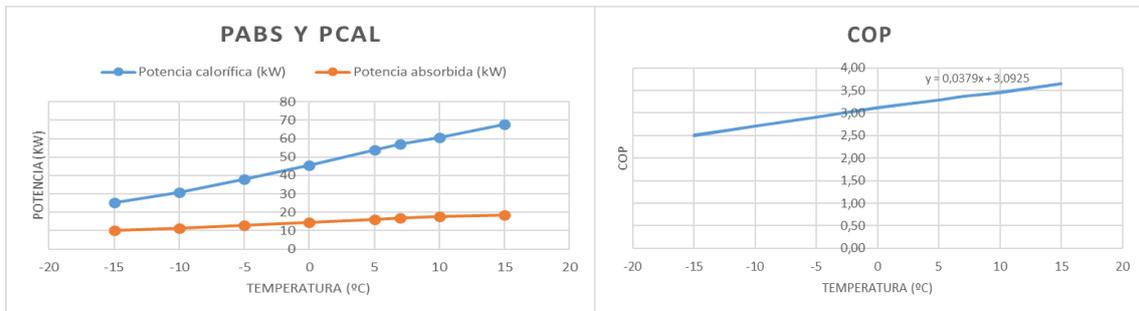


Figura 6.9. Potencia absorbida, potencia calorífica y COP en función de la temperatura exterior de la BC PMC.Lab

Como el catálogo no ofrece el cambio del COP en función de la carga en cada temperatura exterior, se ha supuesto un mismo COP en potencia nominal como a cargas parciales.

Las potencias absorbidas cada hora se calculan a partir de las demandas horarias de los edificios. Si al consumo eléctrico de la BC se le suma el consumo eléctrico del LCCE y se compara con la producción eléctrica de la nueva instalación fotovoltaica, se consiguen los gráficos de la Figura 6.11, donde se representa el consumo vs la producción eléctrica en cada día tipo de cada mes.

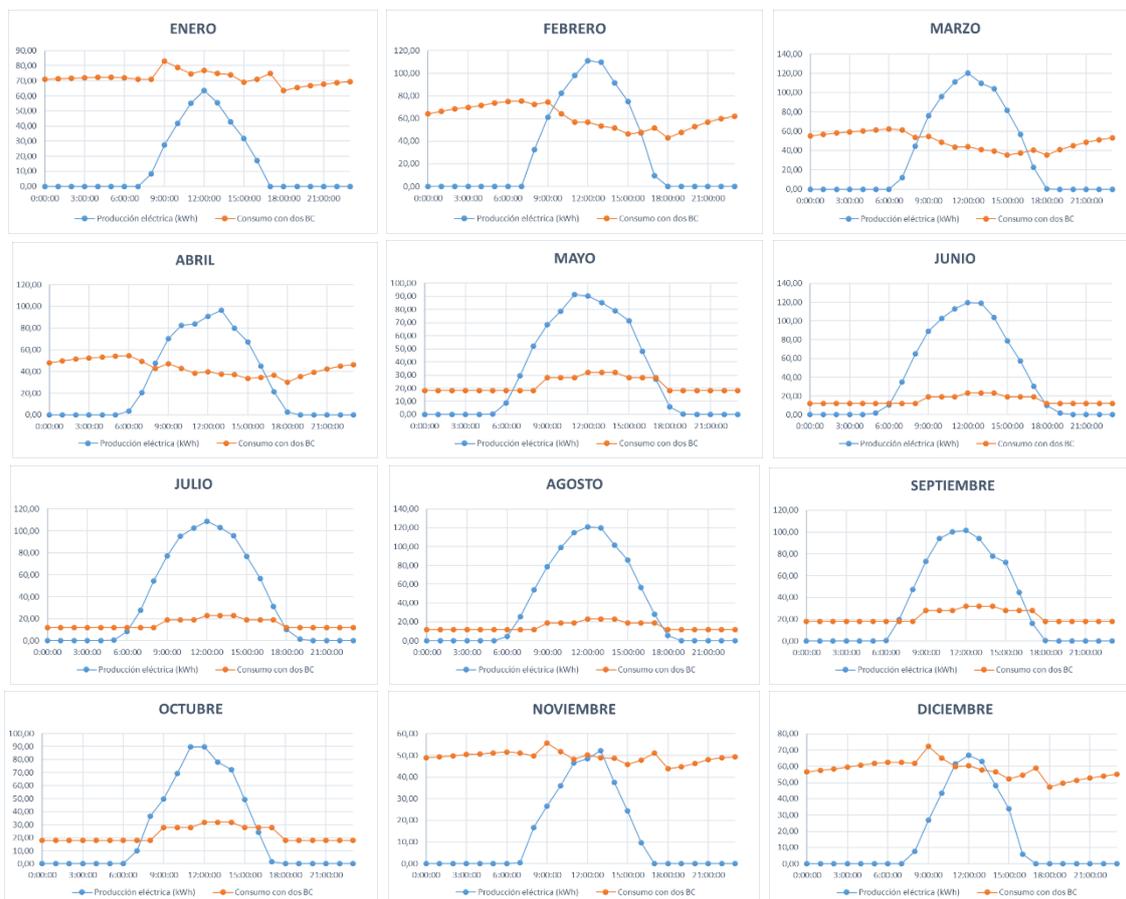


Figura 6.11. Consumo vs producción eléctrica mensual LCCE

Como se puede ver, durante la noche la producción eléctrica es nula por falta de radiación solar, pero durante el día la producción crece hasta el mediodía y se reduce de nuevo cuando el sol cae. En esas horas donde la producción eléctrica es positiva, se pueden abastecer las demandas eléctricas del edificio del LCCE, y cuando la producción es mayor que el consumo eléctrico, se empezará a abastecer el consumo de las BC; además, y si la energía sobrante aún es mayor que el consumo del LCCE y el de las BC se inyectará a la red, recibiendo un importe mínimo por ese aporte a la red eléctrica de España.

Por lo que se ve en la Figura 6.11 durante los meses de verano las BC no funcionan. En invierno se aprecia que el consumo puede ser mayor que la producción incluso en las horas centrales del día. En esa situación las BC se abastecerían también con energía eléctrica de la red.

Por consiguiente, aunque en muchas ocasiones no se pueda abastecer completamente el consumo de las BC con la producción eléctrica de la instalación fotovoltaica, supondrá un

ahorro tanto económico como de emisiones de CO₂ a la atmosfera que se tendrán en cuenta en el análisis económico y en el análisis medioambiental.

6.4.1 Nuevos elementos terminales

El previo análisis se ha hecho teniendo en cuenta que los elementos terminales no se van a cambiar, pero, si se cambiasen, el horario de funcionamiento podría ser de 4:00 a 21:00, lo que supondría un consumo eléctrico de las bombas mucho menor, ver Figura 6.12. Como se ve, de 21:00 a 4:00 solamente habría un consumo asociado al consumo eléctrico del LCCE y las BC estarían apagadas. De 4:00 a 21:00 las BC entrarían en funcionamiento con una subida del consumo, sobre todo en los meses de invierno.

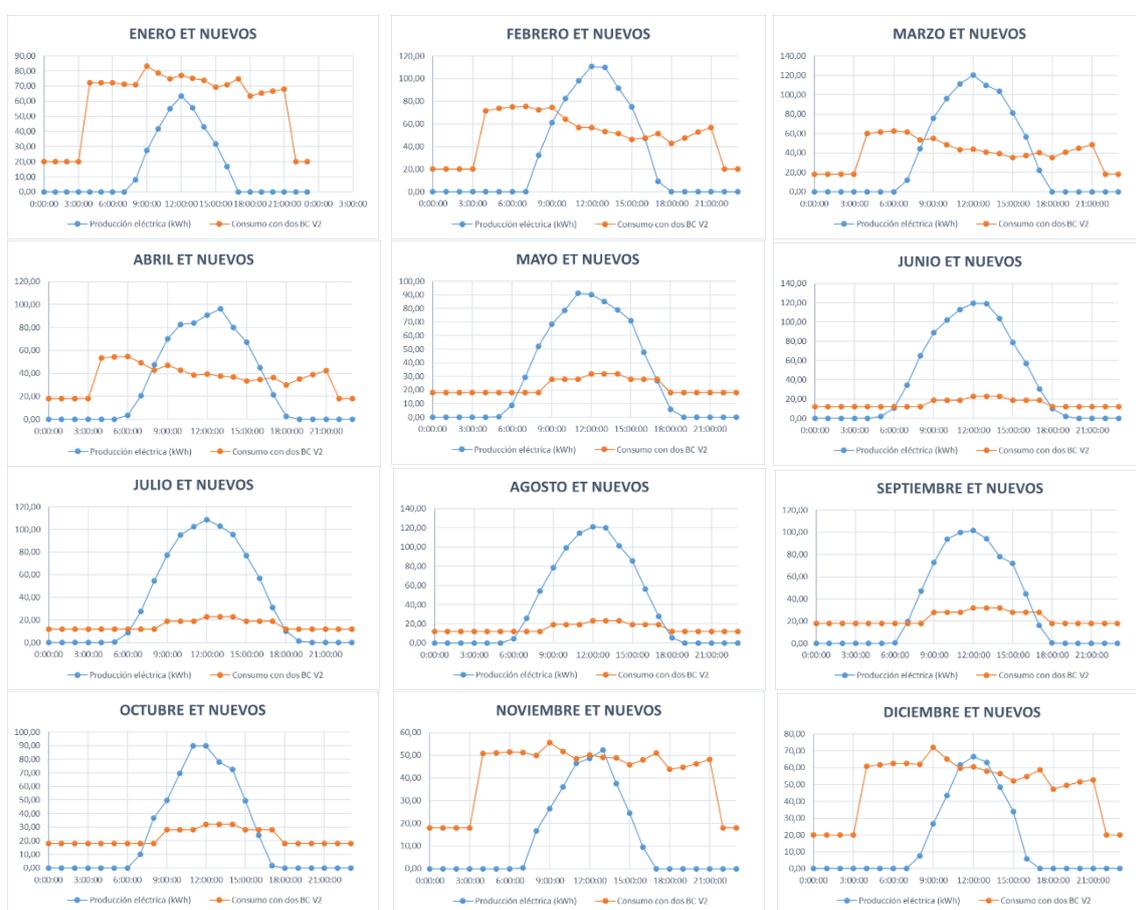


Figura 6.12. Consumo vs producción eléctrica mensual con elementos terminales nuevos

Analíticamente se obtienen los siguientes resultados de ahorro para un periodo mensual en cada uno de los edificios del LCCE:

Tabla 6.9. Ahorro energético del edificio Main.B con los elementos terminales nuevos

Mes	Pot Abs Main.B (kWh)	Pot Abs Main.B TE Nuevos (kWh)
Enero	17857,02	12893,14
Febrero	12276,81	8279,49

Marzo	10629,55	6947,45
Abril	8255,07	5242,80
Mayo	0,00	0,00
Junio	0,00	0,00
Julio	0,00	0,00
Agosto	0,00	0,00
Septiembre	0,00	0,00
Octubre	0,00	0,00
Noviembre	10554,81	7483,76
Diciembre	12375,09	8770,14
TOTAL	71948,35	49616,79

Tabla 6.10. Ahorro energético del edificio PMC.Lab con los elementos terminales nuevos

Mes	Pot Abs PMC.Lab (kWh)	Pot Abs PMC.Lab TE Nuevos (kWh)
Enero	5131,07	3707,74
Febrero	3536,71	2387,48
Marzo	3074,49	2011,88
Abril	2395,32	1523,06
Mayo	0,00	0,00
Junio	0,00	0,00
Julio	0,00	0,00
Agosto	0,00	0,00
Septiembre	0,00	0,00
Octubre	0,00	0,00
Noviembre	3060,71	2171,59
Diciembre	3578,25	2537,44
TOTAL	20776,55	14339,21

Por lo tanto, el ahorro energético total sería de unos 28768,91 kWh, lo que supone un ahorro del 31% del consumo eléctrico respecto a la situación de los actuales elementos terminales.

6.5 Análisis aerotérmico con caldera de apoyo

En este apartado, se determinan unas potencias caloríficas de las BC inferiores a las potencias o cargas máximas necesarias para abastecer parte de la demanda de los edificios Main.B y PMC.Lab para que la demanda restante la abastezca una caldera estándar de gas natural de apoyo. Esas calderas estándares van a ser las calderas que ya están actualmente en el LCCE, por lo que la inversión inicial será menor, ya que no habrá que invertir en las calderas y las BC tendrán una potencia menor y, por ende, un precio menor.

En este caso, a diferencia de en el análisis geotérmico solo se han tenido en cuenta los datos de los meses de noviembre a abril, para que el dimensionamiento sea lo más correcto posible por lo que se sabe que las horas de funcionamiento de las BC será inferior a las estimadas en el apartado 6.3, en concreto, serán 4344 horas.

Teniendo en cuenta esta suposición, la curva de la demanda en función de las horas del año a las que debe funcionar con esa potencia es la siguiente tanto para el edificio Main.B como para el PMC.Lab.

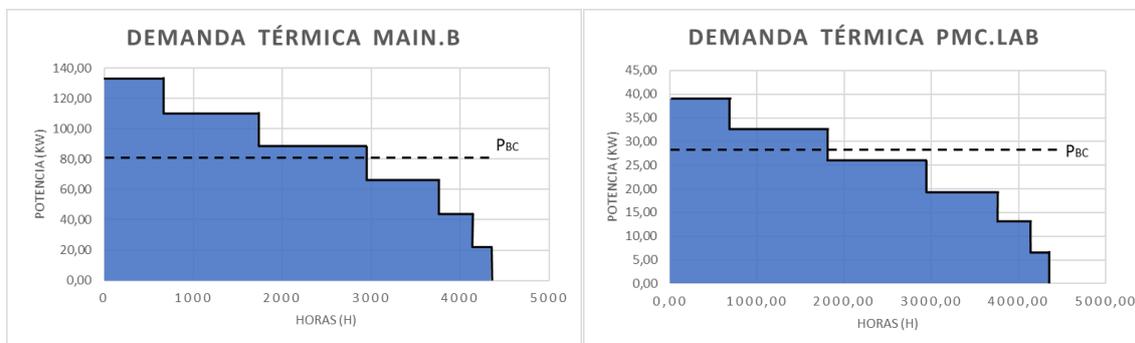


Figura 6.13. Curva de demanda térmica de los edificios del LCCE

Como se puede observar, la potencia térmica máxima que podrá ofrecer la BC en el edificio Main.B será de 81,5 kW y en el de PMC.Lab de 28 kW. Por ello, a partir de esa potencia térmica entrará en funcionamiento la caldera, con un área menor que el área abastecida por la BC, donde el área total representa la demanda térmica del edificio.

Las BC escogidas para cada edificio se muestran en la Tabla 6.11:

Tabla 6.11. Características de las BC elegidas

BC Main.B	
Marca	Tecna
Modelo	Black HT 85
Capacidad calorífica nominal (kW)	81,5
COP	3,24
Peso (kg)	1505
Ancho x Largo x Alto (mm)	3508 x 1208 x 1912
Ventilador	Axial
Compresor	Alternativo
Evaporador	Intercambiador de calor de placas
Condensador	Intercambiador de calor de placas
Refrigerante	R134A
Precio	37.570,00 €
BC PMC.Lab	
Marca	Panasonic
Modelo	AQUAREA PRO S-250WX2E5
Capacidad calorífica nominal (kW)	28
COP	3,25
Peso (kg)	165
Ancho x Largo x Alto (mm)	395 x 965 x 1000
Compresor	Inverter
Evaporador	Intercambiador de calor de placas
Condensador	Intercambiador de calor de placas
Refrigerante	R410A
Precio	15.528,00 €

Como se ha explicado en el apartado 6.4 las BC aerotérmicas dependen de la temperatura exterior, por lo que los catálogos de las BC aportan los diferentes valores de potencia absorbida por el compresor, potencia calorífica nominal y COP para las diferentes temperaturas exteriores. Esos valores se pueden ver en las gráficas de la Figura 6.15 y la Figura 6.14.

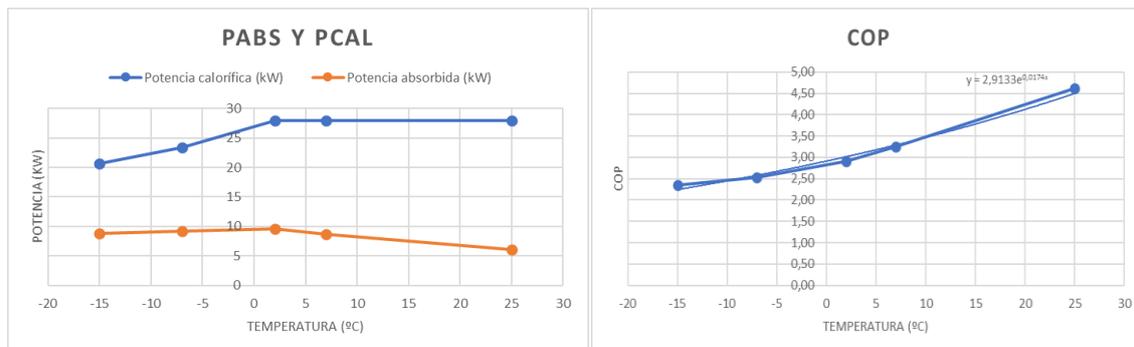


Figura 6.15. Potencia absorbida, potencia calorífica y COP en función de la temperatura exterior de la BC PMCLab

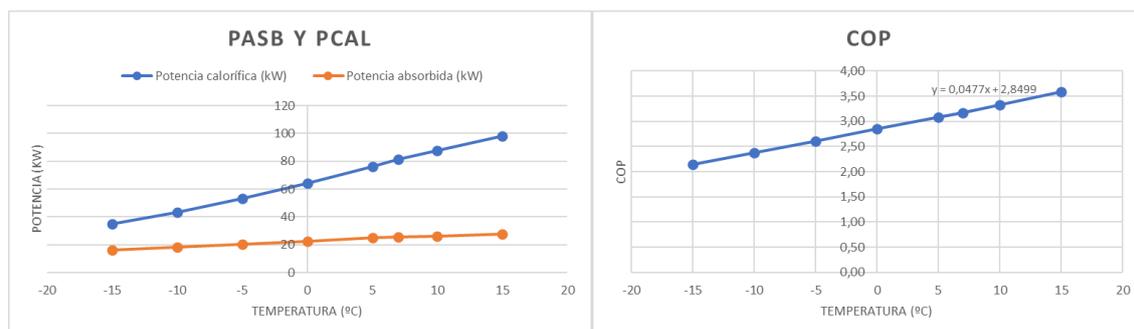


Figura 6.14. Potencia absorbida, potencia calorífica y COP en función de la temperatura exterior de la BC Main.B

Además, como pasaba en el anterior apartado, los catálogos no ofrecen el cambio del COP en función de la carga en cada temperatura exterior, por lo tanto, se ha supuesto que el mismo COP tanto si está trabajando en potencia nominal como a cargas parciales.

Siguiendo con el procedimiento del apartado anterior, sabiendo el COP y las potencias absorbidas por las BC, y según la temperatura exterior y los datos de las temperaturas de los días tipos de cada mes, se grafica el perfil de producción eléctrica que ofrecen los paneles fotovoltaicos vs los consumos eléctricos del LCCE junto con los consumos eléctricos de las BC, Figura 6.16. Se puede apreciar que no se han contemplado los meses de mayo a octubre porque las gráficas son iguales que las de la Figura 6.11, ya que en esos meses el consumo eléctrico de las BC es nulo.



Figura 6.16. Consumo vs producción eléctrica mensual LCCE

Comparando estas gráficas con las gráficas de la Figura 6.11, se puede observar que durante las horas centrales del día el consumo eléctrico es muy parecido, pero en las horas de las mañanas y de las noches el consumo se reduce ligeramente. Esto es debido a la caldera de apoyo. Como la caldera de apoyo solo entra en funcionamiento en las horas donde menor es la temperatura, y como las horas de menor temperatura suelen darse usualmente en las horas de las mañanas y de las noches, es normal que el consumo de las BC durante esas horas sea menor.

Esto se ve claramente si se analiza la curva de demanda cubierta por las calderas:



Figura 6.17. Demanda térmica cubierta por la caldera mensualmente

Como se ha comentado previamente, la demanda es mayor en las horas de las mañanas y de las noches, y solamente en el mes de enero hay algo de demanda en las horas centrales del día. Lo que vemos en esta figura es que en enero las temperaturas son muy bajas en Vitoria Gasteiz y que prácticamente, el mayor consumo de gas natural debido a la utilización de las calderas se va a dar en este mes y en diciembre por las mañanas.

Por otro lado, el ahorro eléctrico que aportan los paneles fotovoltaicos no cambiaría mucho respecto al comentado en el apartado 6.4, ya que en las horas donde se produce electricidad mediante los paneles el consumo eléctrico de las BC se mantiene más o menos igual que en la primera opción planteada. Esto es por lo que se ha comentado de que las calderas solo

entran en funcionamiento cuando las temperaturas son bajas, y en las horas centrales las temperaturas no suelen ser tan bajas.

6.5.1 Nuevos elementos terminales

Al igual que en la opción anterior, se ha hecho el análisis sin cambiar los elementos terminales que hay actualmente en el edificio LCCE, pero si se cambiasen lo elementos terminales a unos más adecuados que trabajasen óptimamente a 40-45°C el consumo sería menor ya que las BC trabajarían de 4:00 a 21:00 evitando el alto consumo eléctrico de las noches, donde las temperaturas son más bajas y la demanda es mayor.

Con esta suposición los perfiles de consumo eléctrico y de demanda térmica cubierta por las calderas de un día tipo serían los siguientes para los meses de funcionamiento de las BC y calderas:



Figura 6.19. Demanda térmica cubierta por las calderas con elementos terminales nuevos



Figura 6.18. Consumo vs producción eléctrica mensual con elementos terminales nuevos

Analizando este ahorro energético eléctrico analíticamente se obtienen los siguientes resultados para un periodo mensual en cada uno de los edificios del LCCE:



Tabla 6.12. Ahorro energético eléctrico del edificio Main.B con los elementos terminales nuevos

Mes	Pot Abs Main.B (kWh)	Pot Abs Main.B TE Nuevos (kWh)
Enero	12170,80854	9175,75684
Febrero	9187,095511	6430,088703
Marzo	9308,982915	6191,714674
Abril	8131,358321	5126,322778
Mayo	0	0
Junio	0	0
Julio	0	0
Agosto	0	0
Septiembre	0	0
Octubre	0	0
Noviembre	10710,89936	7568,833826
Diciembre	11062,84451	7938,244709
TOTAL	60571,98917	42430,96153

Tabla 6.13. Ahorro energético eléctrico del edificio PMC.Lab con los elementos terminales nuevos

Mes	Pot Abs PMC.Lab (kWh)	Pot Abs PMC.Lab TE Nuevos (kWh)
Enero	4504,623212	3340,82214
Febrero	3173,633767	2141,073786
Marzo	3034,737044	1962,856193
Abril	2432,527239	1540,724113
Mayo	0	0
Junio	0	0
Julio	0	0
Agosto	0	0
Septiembre	0	0
Octubre	0	0
Noviembre	3115,554043	2205,974431
Diciembre	3582,862653	2517,284661
TOTAL	19843,93796	13708,73532

Por lo tanto, el ahorro energético eléctrico total sería de unos 24276,23 kWh, lo que supone un 30% del consumo eléctrico sin cambiar los elementos terminales.

6.6 Análisis económico de las diferentes opciones

6.6.1 *Análisis económico de la instalación geotérmica*

El presupuesto de la instalación geotérmica sería aproximadamente el siguiente, basando los precios en presupuestos reales de instalaciones geotérmicas [53]:

Tabla 6.14. Presupuesto de la instalación geotérmica

DESIGNACIÓN	PRECIO (€)
Mano de obra	100.000,00 €
Materiales	
Sonda PE 100-RC	53.440,00 €
Otros materiales (arenas, morteros, coquillas, adaptadores, tubos...)	15.000,00 €
Equipos	
Electrobomba Calpeda modelo NR4 3kW	2.168,93 €
Bomba de calor geotérmica Carrier 61WG-140	18.600,00 €
Bomba de calor geotérmica Carrier 61WG-040	9.999,00 €
Acondicionamiento del terreno	500.000,00 €
Presupuesto de ejecución material	699.207,93 €
Gastos generales (13%)	90.897,03 €
Beneficio industrial (6%)	41.952,48 €
IVA (21%)	146.833,67 €
INVERSIÓN TOTAL	978.891,10 €

Como se puede observar la inversión inicial es muy elevada, la cual se debe comparar con el ahorro anual. Para ello, se consideran [50] el precio del gas por kWh (0,0611 €/kWh), el precio de la electricidad medio por kWh (0,0828 €/kWh) y los consumos de gas natural en kWh, que se pueden ver en la segunda columna de la Tabla 6.15. Con estos datos y con los datos de consumo eléctrico mensual de las BC se obtienen los siguientes gastos respectivos a cada tecnología:

Tabla 6.15. Gastos anuales eléctricos vs gas natural

Mes	Consumo gas natural (kWh)	Consumo eléctrico (kWh)	Gasto elec. (€)	Gasto G.N. (€)
Enero	20488,12	16004,31173	1.325,16 €	1.251,82 €
Febrero	20244,92	11193,7787	926,84 €	1.236,96 €
Marzo	18919,52	9938,291837	822,89 €	1.155,98 €
Abril	17759,82	7877,64372	652,27 €	1.085,13 €
Mayo	9748,45	0	- €	595,63 €
Junio	4039,3	0	- €	246,80 €
Julio	173,9	0	- €	10,63 €
Agosto	176,05	0	- €	10,76 €
Septiembre	183,06	0	- €	11,18 €
Octubre	4410,07	0	- €	269,46 €
Noviembre	16951,36	10025,90326	830,14 €	1.035,73 €
Diciembre	20321,11	11541,53232	955,64 €	1.241,62 €
		TOTAL	5.512,95 €	8.151,70 €



Por lo tanto, el ahorro anual sería de 2.638,75€/año.

El PayBack simple indica en cuantos años se amortizaría la inversión inicial y se calcula de la siguiente forma:

$$PayBack = \frac{Inversión\ inicial}{Ahorro\ anual} \quad (16)$$

Como se tienen todos los datos, el PayBack sería de 370,96 años, es decir, unos 371 años, y si se tiene en cuenta que la vida útil de una instalación de este tipo suele ser de 50 años se podría decir que la inversión de la instalación geotérmica no es rentable.

A lo largo de los anteriores años el EVE (Ente Vasco de la Energía) ha concedido subvenciones de hasta el 30% de la instalación a instalaciones geotérmicas de potencias mayores a 70 kW [54]. Pero aun aplicando el descuento por la subvención, la inversión sería de 685.223,77 € y el PayBack sería de 259,67 años, es decir, 260 años.

Por lo tanto, definitivamente, se podría decir que la instalación geotérmica no sería rentable desde el punto de vista económico.

6.6.2 Análisis económico de la instalación aerotérmica sin caldera de apoyo

El presupuesto de la instalación aerotérmica sin caldera de apoyo sería el siguiente teniendo en cuenta que el circuito hidráulico se mantendría igual y que solo se cambian las bombas de circulación del circuito por una que propone el catálogo para cada BC y cada edificio del LCCE:

Tabla 6.16. Presupuesto de la instalación aerotérmica sin caldera de apoyo

DESIGNACIÓN	CANTIDAD	PRECIO (€)
Bomba de calor Tecna Black HT 200	1	70.000,00 €
Bomba de calor Tecna Black HT 65	1	30.772,00 €
Bomba hidráulica de circulación	2	4.802,00 €
Relé para gestión de bombas	2	250,00 €
Presupuesto de ejecución material		105.824,00 €
Gastos generales	13%	13.757,12 €
Beneficio industrial	6%	6.349,44 €
INVERSIÓN TOTAL		125.930,56 €

En este caso, al no realizarse ninguna obra, la inversión inicial es menor, pero las BC aerotérmicas son más caras que las geotérmicas, por lo tanto, la inversión inicial es bastante elevada. De manera análoga, se han obtenido los siguientes datos de gastos:

Tabla 6.17. Gastos anuales eléctricos vs gas natural

Mes	Consumo gas natural (kWh)	Gasto elec. (€)	Gasto G.N. (€)
Enero	20488,12	1.783,87 €	1.251,82 €
Febrero	20244,92	1.065,79 €	1.236,96 €
Marzo	18919,52	901,55 €	1.155,98 €
Abril	17759,82	704,71 €	1.085,13 €
Mayo	9748,45	- €	595,63 €
Junio	4039,3	- €	246,80 €
Julio	173,9	- €	10,63 €
Agosto	176,05	- €	10,76 €
Septiembre	183,06	- €	11,18 €
Octubre	4410,07	- €	269,46 €
Noviembre	16951,36	1.013,57 €	1.035,73 €
Diciembre	20321,11	1.182,33 €	1.241,62 €
	TOTAL (€)	6.651,81 €	8.151,70 €

Para calcular el gasto eléctrico se ha tenido en cuenta el ahorro eléctrico gracias a los paneles fotovoltaicos y los datos de consumos y producción diarios de la Figura 6.11.

Por lo tanto, el ahorro anual sería de 1.499,88 € y utilizando el indicador de rentabilidad del PayBack se obtiene que para amortizar la inversión inicial de la instalación se necesitarían 83,96 años, es decir, 84 años.

Teniendo en cuenta que la vida útil de una instalación aerotérmica es de unos 25 años se podría decir que no es rentable, pero si se analizase el PayBack con las ayudas o subvenciones que ha ofrecido el EVE estos últimos años para instalaciones aerotérmicas [55] y suponiendo que el área calefactada por las BC suponen 17 viviendas se obtiene que la subvención supone una cuantía de 66.300 € y la inversión inicial se reduciría hasta los 59.630,56 € y el PayBack hasta los 40 años.

Por lo tanto, aunque se aplique el descuento debido a la subvención, la inversión inicial de la instalación aerotérmica no es rentable, y además el ahorro anual sería mayor, ya que como se ve en la Figura 6.11 durante muchos momentos del año habrá un excedente de electricidad producida que se inyectará en la red obteniendo de vuelta una recompensa económica variable por kWh dependiendo de en hora se inyecte (siendo una instalación de más de 100 kW, según la REE (Red Eléctrica de España, se considera una instalación productora y entra en el mercado eléctrico.) Esto haría que el PayBack también se redujese y sería algo más rentable que lo calculado previamente.

6.6.3 Análisis económico de la instalación aerotérmica con caldera de apoyo

El presupuesto de la instalación aerotérmica con caldera de apoyo sería el siguiente teniendo en cuenta que el circuito hidráulico se mantendría igual y que solo se cambiarían

las bombas de circulación del circuito por una que proponen los catálogos para cada BC y cada edificio del LCCE:

Tabla 6.18. Presupuesto de la instalación aerotérmica con caldera de apoyo

DESIGNACIÓN	CANTIDAD	PRECIO (€)
Bomba de calor Tecna Black HT 85	1	37.570,00 €
Bomba de calor Panasonic AQUAREA PRO S-250WX2E5	1	15.528,00 €
Bomba hidráulica de circulación	2	4.802,00 €
Relé para gestión de bombas	2	250,00 €
Presupuesto de ejecución material		58.150,00 €
Gastos generales	13%	7.559,50 €
Beneficio industrial	6%	3.489,00 €
INVERSIÓN TOTAL		69.198,50 €

En este caso tampoco hay que realizar ninguna obra para instalar las BC y además la inversión inicial es menor porque las BC tienen menor potencia y el precio depende principalmente de ello. Análogamente, se han obtenido los siguientes datos de gastos:

Tabla 6.19. Gastos anuales de instalación actual vs instalación propuesta

Mes	Consumo gas natural (kWh)	Gasto elec. (€)	Gasto G.N. ACTUAL (€)	Gasto G.N. PROPUESTA (€)
Enero	20488,12	1.261,18 €	1.251,82 €	1.693,38 €
Febrero	20244,92	776,62 €	1.236,96 €	939,39 €
Marzo	18919,52	785,58 €	1.155,98 €	422,42 €
Abril	17759,82	694,68 €	1.085,13 €	85,30 €
Mayo	9748,45	- €	595,63 €	- €
Junio	4039,3	- €	246,80 €	- €
Julio	173,9	- €	10,63 €	- €
Agosto	176,05	- €	10,76 €	- €
Septiembre	183,06	- €	11,18 €	- €
Octubre	4410,07	- €	269,46 €	- €
Noviembre	16951,36	1.030,50 €	1.035,73 €	34,48 €
Diciembre	20321,11	1.071,73 €	1.241,62 €	428,09 €
	TOTAL (€)	5.620,28 €	8.151,70 €	3.603,05 €

En este caso, para calcular el gasto eléctrico se han tenido en cuenta el ahorro eléctrico gracias a los paneles fotovoltaicos y los datos de consumos y producción diarios de la Figura 6.16 y para calcular el gasto de gas natural de la instalación propuesta se han tenido en

cuenta los datos de demanda cubierta por las calderas de la Figura 6.17 y los rendimientos estacionales de cada una de las calderas (78,57% Main.B y 68,88% PMC.Lab).

A diferencia de las otras dos opciones no existe un ahorro económico anual, ya que se gastarían anualmente 1.071,63 € más que con la instalación actual. Esto es debido a que en la instalación actual la caldera está en funcionamiento solamente 10 horas y en la instalación propuesta tendría que estar las 24 horas activa. Es cierto que no está las 24 horas en funcionamiento, pero las horas en las que está en funcionamiento son las de mayor demanda térmica y por lo tanto el consumo de gas natural en esas horas puede suplir el consumo de las horas centrales del día sin BC.

Por lo tanto, se podría decir que los gastos de cada una de las instalaciones no son comparables, porque se deben contrastar las dos opciones actuando la misma cantidad de horas. Haciendo ese análisis se obtienen los siguientes resultados de gastos económicos:

Tabla 6.20. Gastos mensuales de la instalación actual vs propuesta con mismas horas de funcionamiento (8:00h-18:00h)

Mes	Consumo gas natural (kWh)	Gasto elec. (€)	Gasto G.N. ACTUAL (€)	Gasto G.N. PROPUESTA (€)
Enero	20488,12	514,93 €	1.251,82 €	464,47 €
Febrero	20244,92	108,68 €	1.236,96 €	129,73 €
Marzo	18919,52	63,77 €	1.155,98 €	17,76 €
Abril	17759,82	36,03 €	1.085,13 €	- €
Mayo	9748,45	- €	595,63 €	- €
Junio	4039,3	- €	246,80 €	- €
Julio	173,9	- €	10,63 €	- €
Agosto	176,05	- €	10,76 €	- €
Septiembre	183,06	- €	11,18 €	- €
Octubre	4410,07	- €	269,46 €	- €
Noviembre	16951,36	315,66 €	1.035,73 €	1,52 €
Diciembre	20321,11	326,85 €	1.241,62 €	75,63 €
TOTAL (€)		1.365,92 €	8.151,70 €	689,12 €

Y con estos gastos se obtiene que el ahorro anual sería de 6.096,66 €, con un Payback de 11,35 años.

Pero como ya se ha comentado, este análisis se ha hecho para que sean comparables, pero no sería real ya que la instalación propuesta el agua de circulación circula a bajas temperaturas, entre 40 y 45°C.

6.7 Análisis medioambiental de las diferentes opciones

Para el análisis medioambiental es necesario saber cuáles son los kg de CO₂ que se emiten por kg de gas natural y por kg de electricidad (Tabla 6.21) además de saber cuál es el consumo tanto de gas natural como de electricidad en kWh, para ver cuál es el ahorro de esos kg de CO₂ emitidos anualmente.

Tabla 6.21. kgCO₂/kWh de gas natural y de electricidad

kg CO₂ Gas Natural por kWh	0,252
kg CO₂ Electricidad por kWh	0,357

6.7.1 Análisis medioambiental de la instalación geotérmica

Para esta opción se han tenido en cuenta los consumos mostrados en la Tabla 6.15 y las emisiones de CO₂ de la Tabla 6.21 y estos son los resultados obtenidos:

Tabla 6.22. kg CO₂ de gas natural vs electricidad

Mes	kgCO ₂ Gas Natural	kgCO ₂ Electricidad
Enero	5163,01	5713,54
Febrero	5101,72	3996,18
Marzo	4767,72	3547,97
Abril	4475,47	2812,32
Mayo	2456,61	0,00
Junio	1017,90	0,00
Julio	43,82	0,00
Agosto	44,36	0,00
Septiembre	46,13	0,00
Octubre	1111,34	0,00
Noviembre	4271,74	3579,25
Diciembre	5120,92	4120,33
TOTAL kg CO₂	33620,75	23769,58

Así, se consigue que el ahorro de kg de CO₂ es de 9851,17 kg, por lo tanto, se puede decir que es una muy buena opción desde el punto de vista medioambiental.

6.7.2 Análisis medioambiental de la instalación aerotérmica sin caldera de apoyo

Para esta opción se han tenido en cuenta el consumo y producción eléctrica mostrados en la Figura 6.11 y las emisiones de CO₂ de la Tabla 6.21 y estos han sido los resultados obtenidos:

Tabla 6.23. kg CO₂ de gas natural vs electricidad

Mes	kgCO ₂ Gas Natural	kgCO ₂ Electricidad
Enero	5163,01	8206,75
Febrero	5101,72	5645,43
Marzo	4767,72	4892,34
Abril	4475,47	3802,19
Mayo	2456,61	0,00
Junio	1017,90	0,00



Julio	43,82	0,00
Agosto	44,36	0,00
Septiembre	46,13	0,00
Octubre	1111,34	0,00
Noviembre	4271,74	4860,74
Diciembre	5120,92	5695,34
TOTAL kg CO2	33620,75	33102,79

Por los datos obtenidos, se consigue que el ahorro de kg de CO₂ es de 517,96 kg, por lo tanto, se puede decir que es una buena opción desde el punto de vista medioambiental.

6.7.3 Análisis medioambiental de la instalación aerotérmica con caldera de apoyo

Para esta opción se han tenido en cuenta el consumo y producción eléctrica mostrados en la Figura 6.16, la demanda térmica cubierta por las caldera de la Figura 6.17 y las emisiones de CO₂ mostradas en la Tabla 6.21 y estos han sido los resultados obtenidos:

Tabla 6.24. kg de CO₂ de la instalación actual vs propuesta

Mes	kgCO2 Gas Natural ACTUAL	kgCO2 Electricidad	kgCO2 Gas Natural PROPUESTA
Enero	5163,01	5953,13	4176,50
Febrero	5101,72	4412,78	2314,37
Marzo	4767,72	4406,71	1056,51
Abril	4475,47	3771,31	217,17
Mayo	2456,61	0,00	0,00
Junio	1017,90	0,00	0,00
Julio	43,82	0,00	0,00
Agosto	44,36	0,00	0,00
Septiembre	46,13	0,00	0,00
Octubre	1111,34	0,00	0,00
Noviembre	4271,74	4936,04	87,79
Diciembre	5120,92	5228,52	1075,30
TOTAL kg CO2	33620,75	28708,49	8927,64

En este caso no hay ahorro de kg de CO₂ emitidos, porque se emitirían 4015,37 kg de CO₂ más a la atmosfera respecto a la instalación actual, por lo tanto, no es una buena opción desde el punto de vista medioambiental.

CONCLUSIONES

El estudio realizado se resume en la siguiente tabla, donde se indica la rentabilidad tanto económica como medioambiental con sus respectivos indicadores:

Tabla 6.25. Tabla resumen de las opciones propuestas

OPCIONES	INVERSIÓN INICIAL (€)	PAYBACK (años)	PAYBACK CON SUBVENCIÓN (años)	VIDA ÚTIL (años)	AHORRO Kg CO ₂
Instalación geotérmica	978.891,1	370,96	259,67	50	9851,17
Instalación aerotérmica sin caldera de apoyo	125.930,56	83,96	39,76	25	517,96
Instalación aerotérmica con caldera de apoyo	69.198,5	X	X	25	-4015,37

Como se ve en la Tabla 6.25, se concluye que la instalación geotérmica no es rentable logísticamente debido a la necesidad de obra y la falta de espacio disponible; esto hace que la instalación tampoco sea rentable económicamente debido a alta inversión inicial. Sin embargo medioambientalmente es la mejor opción.

Por otro lado, se concluye que de las instalaciones aerotérmicas la que no tiene calderas de apoyo es la única que tiene rentabilidad si no se cambian los elementos terminales, que es uno de los requisitos del LCCE. Pero se ha demostrado que si se cambiasen esos elementos terminales las horas de funcionamiento serían menores, y la mejor opción sería la combinación de BC con caldera de apoyo. Esto haría que las dos instalaciones fuesen inmensamente más rentables tanto económica como medioambientalmente.

No obstante, teniendo en cuenta que los elementos terminales no van a ser reemplazados por otros que trabajen óptimamente a bajas temperaturas y que la opción más rentable en esta situación es la de la instalación aerotérmica sin calderas de apoyo, se podría aconsejar al LCCE que la tarifa de la luz que contraten sea una tarifa variable y no fija, ya que por la noche, donde la demanda térmica es menor, corresponde normalmente a las horas valle de la tarifa eléctrica, con menor precio, lo que supondría un ahorro económico importante, aunque no un ahorro en las emisiones de kg de CO₂.

Con todo esto, se puede concluir que la instalación geotérmica no es rentable en ninguno de los casos, aunque medioambientalmente sea la mejor opción, y que de entre las dos opciones de instalación aerotérmica, si no se cambian los elementos terminales, la que no tiene calderas de apoyo sería la más rentable, aunque si se cambiasen los elementos terminales habría que analizar la opción de la instalación aerotérmica con calderas de apoyo, ya que su inversión inicial sería menor que la anterior y podría llegar a ser la opción más rentable desde el punto de vista económico.



6.8 Implicaciones del trabajo

Se debe mencionar que este trabajo se presentará en el congreso internacional “XII National and III International Conference on Engineering Thermodynamics” en la Universidad Juan Carlos III de Madrid en Madrid, España, del 29 de junio al 1 de julio de 2022, hecho que recalca la relevancia del trabajo y su difusión.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] IDAE. (s. f.). *EDIFICACIÓN*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. <https://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/edificacion>
- [2] Sech-Spahousec, P. (2011). Análisis del consumo energético del sector residencial en España. *Informe Final, Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía*.
- [3] ANDJOSE SALA-LIZARRAGA, Ana Picallo Perez. *Exergy Analysis and Thermoconomics of Buildings*. 2020.
- [4] *Funcionamiento de las Bombas de Calor Aerotérmicas | AFEC*. (s. f.). Bombadecolor. <https://www.bombadecolor.org/noticias/funcionamiento-de-las-bombas-de-calor-aerotermicas>
- [5] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2016). IDAE Síntesis del Estudio Parque de Bombas de Calor en España.
- [6] Norma UNE-EN 14825 (2012) *Acondicionadores de aire, enfriadoras de líquido y bombas de calor con compresor accionado eléctricamente para la calefacción y la refrigeración de locales. Ensayos y clasificación en condiciones de carga parcial y cálculo del rendimiento estacional*, AENOR.
- [7] Norma UNE-EN 12309-1(2015) *Aparatos de sorción para calefacción y/o refrigeración que utilizan combustibles gaseosos de consumo calorífico basado en el PCI inferior o igual a 70 kW. Parte 1: Términos y definiciones*, AENOR.
- [8] Norma UNE-EN 14825(2014) *Acondicionadores de aire, enfriadoras de líquido y bombas de calor con compresor accionado eléctricamente para la calefacción y la refrigeración de locales. Ensayos y clasificación en condiciones de carga parcial y cálculo del rendimiento estacional*, AENOR.
- [9] IDAE, (2014). *Prestaciones medias estacionales de las bombas de calor para la producción de calor en edificios*, Ministerio de Industria, Energía y Turismo.
- [10] Decisión de la Comisión de 1 de marzo de 2013 por la que se establecen las directrices para el cálculo por los Estados Miembros de la energía renovable procedente de las bombas de calor de diferentes tecnologías, D.O.U.E. 6.3.2013.
- [11] Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, D.O.U.E. 5.6.2009.
- [12] Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. BOE nº311, 140488- 140674, 27 de diciembre de 2019.
- [13] Real Decreto 178/2021, de 23 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. BOE nº71, 33748- 33793, 24 de marzo de 2021.
- [14] Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios, D.O.U.E. 18.6.2010.
- [15] MITECO. (2020, noviembre). Estrategia de descarbonización a largo plazo 2050. https://ec.europa.eu/clima/sites/lts/lts_es_es.pdf
- [16] American Psychological Association. (2020). Publication manual of the American Psychological Association (7th ed.). <https://doi.org/10.1037/0000165-000>



- [17] Mukhtar, M., Ameyaw, B., Yimen, N., Quixin, Z., Bamisile, O., Adun, H., & Dagbasi, M. (2021). Building retrofit and energy conservation/efficiency review: A techno-environmental assessment of heat pump system retrofit in housing stock. *Sustainability*, 13(2), 983.
- [18] Gustafsson, M. (2017). Energy Efficient Renovation Strategies for Swedish and Other European Residential and Office Buildings (Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology).
- [19] Massarotti, N., Mauro, A., Normino, G., Vanoli, L., Verde, C., Allocca, V., ... & Cosenza, P. (2021). Innovative Solutions to Use Ground-Coupled Heat Pumps in Historical Buildings: A Test Case in the City of Napoli, Southern Italy. *Energies*, 14(2), 296.
- [20] Carnieletto, L., Emmi, G., Artuzzi, M., Piazza, M. C., Zarrella, A., & De Carli, M. (2019). Retrofit solutions for an historic building integrated with geothermal heat pumps. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 111, p. 03055). EDP Sciences.
- [21] Panagiotidou, M., Aye, L., & Rismanchi, B. (2021). Alternative Heating and Cooling Systems for the Retrofit of Medium-Rise Residential Buildings in Greece. *Energy Technology*, 9(11), 2100377.
- [22] Xu, W., Liu, C., Li, A., Li, J., & Qiao, B. (2020). Feasibility and performance study on hybrid air source heat pump system for ultra-low energy building in severe cold region of China. *Renewable Energy*, 146, 2124-2133.
- [23] Dongellini, M., Naldi, C., & Morini, G. L. (2017). Sizing effects on the energy performance of reversible air-source heat pumps for office buildings. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1073-1081.
- [24] Chen, Y., Hua, H., Wang, J., & Lund, P. D. (2021). Integrated performance analysis of a space heating system assisted by photovoltaic/thermal collectors and ground source heat pump for hotel and office building types. *Renewable Energy*, 169, 925-934.
- [25] Georgiev, A., Popov, R., & Toshkov, E. (2020). Investigation of a hybrid system with ground source heat pump and solar collectors: Charging of thermal storages and space heating. *Renewable Energy*, 147, 2774-2790.
- [26] Tejedor López, R. (2018). Diseño de un sistema de captación híbrida de energía geotérmica, aerotérmica y solar, para su explotación renovable en climatización, sin provocar alteraciones ambientales en el subsuelo ni en el entorno (Doctoral dissertation, ETSI_Energia).
- [27] Barrella, R., Priego, I., Linares, J. I., Arenas, E., Romero, J. C., & Centeno, E. (2020). Feasibility study of a centralised electrically driven air source heat pump water heater to face energy poverty in block dwellings in Madrid (Spain). *Energies*, 13(11), 2723.
- [28] Wang, X., Cui, P., Zhang, W., Zhou, X., & Li, L. (2017). Optimal Design methods and experimental validation for hybrid ground source heat pump system with gas boiler. *Procedia Engineering*, 205, 4149-4156.
- [29] Dongellini, M., Naldi, C., & Morini, G. L. (2021). Influence of sizing strategy and control rules on the energy saving potential of heat pump hybrid systems in a residential building. *Energy Conversion and Management*, 235, 114022.
- [30] Udovichenko, A., & Zhong, L. (2019, September). Application of air-source heat pump (ASHP) technology for residential buildings in Canada. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 609, No. 5, p. 052006). IOP Publishing.



- [31] Zhang, P., Rong, X., Yang, X., & Zhang, D. (2019). Design and performance simulation of a novel hybrid PV/T-air dual source heat pump system based on a three-fluid heat exchanger. *Solar Energy*, 191, 505-517.
- [32] Wang, X., Xia, L., Bales, C., Zhang, X., Copertaro, B., Pan, S., & Wu, J. (2020). A systematic review of recent air source heat pump (ASHP) systems assisted by solar thermal, photovoltaic and photovoltaic/thermal sources. *Renewable Energy*, 146, 2472-2487.
- [33] Guo, X., & Goumba, A. P. (2018). Air source heat pump for domestic hot water supply: Performance comparison between individual and building scale installations. *Energy*, 164, 794-802.
- [34] Torregrosa-Jaime, B., González, B., Martínez, P. J., & Payá-Ballester, G. (2018). Analysis of the operation of an aerothermal heat pump in a residential building using building information modelling. *Energies*, 11(7), 1642.
- [35] Jiang, S., Wang, S., Jin, X., & Yu, Y. (2016). Optimum compressor cylinder volume ratio for two-stage compression air source heat pump systems. *International journal of refrigeration*, 67, 77-89.
- [36] Dongellini, M., Naldi, C., & Morini, G. L. (2017). Sizing effects on the energy performance of reversible air-source heat pumps for office buildings. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1073-1081.
- [37] Zhang, Y., Ma, Q., Li, B., Fan, X., & Fu, Z. (2017). Application of an air source heat pump (ASHP) for heating in Harbin, the coldest provincial capital of China. *Energy and Buildings*, 138, 96-103.
- [38] Fuentes-Bargues, J. L., Fuentes-Bargues, D., Sanchis-Llopis, A., & Verdejo-López, Y. (2017). LA AEROTERMIA COMO ALTERNATIVA A LA CONTRIBUCIÓN SOLAR PARA AGUA CALIENTE SANITARIA (ACS) EN EDIFICACIÓN TERCIARIA.
- [39] Zhang, L., Jiang, Y., Dong, J., & Yao, Y. (2018). Advances in vapor compression air source heat pump system in cold regions: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 353-365.
- [40] Song, M., Deng, S., Dang, C., Mao, N., & Wang, Z. (2018). Review on improvement for air source heat pump units during frosting and defrosting. *Applied energy*, 211, 1150-1170.
- [41] Zhang, Q., Zhang, L., Nie, J., & Li, Y. (2017). Techno-economic analysis of air source heat pump applied for space heating in northern China. *Applied energy*, 207, 533-542.
- [42] Zou, D., Ma, X., Liu, X., Zheng, P., Cai, B., Huang, J., ... & Liu, M. (2017). Experimental research of an air-source heat pump water heater using water-PCM for heat storage. *Applied Energy*, 206, 784-792.
- [43] Niemelä, T., Levy, K., Kosonen, R., & Jokisalo, J. (2017). Cost-optimal renovation solutions to maximize environmental performance, indoor thermal conditions and productivity of office buildings in cold climate. *Sustainable cities and society*, 32, 417-434.
- [44] Wu, S., Dai, Y., Li, X., Oppong, F., & Xu, C. (2018). A review of ground-source heat pump systems with heat pipes for energy efficiency in buildings. *Energy Procedia*, 152, 413-418.
- [45] Aditya, G. R., Mikhaylova, O., Narsilio, G. A., & Johnston, I. W. (2020). Comparative costs of ground source heat pump systems against other forms of heating and cooling for different climatic conditions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100824.



- [46] Zhou, K., Mao, J., Li, Y., & Zhang, H. (2020). Performance assessment and techno-economic optimization of ground source heat pump for residential heating and cooling: A case study of Nanjing, China. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40, 100782.
- [47] IDAE. (2012). Guía técnica Diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado. <https://www.idae.es/publicaciones/guia-tecnica-diseno-de-sistemas-de-intercambio-geotermico-de-circuito-cerrado>
- [48] Instituto Nacional de Meteorología de España. (s. f.). AEMET. <http://www.aemet.es/eu/portada>
- [49] de España, M. G. I. Y. (s. f.). IGME. Instituto Geológico y Minero de España. Web Site Oficial España. IGME. Instituto Geológico y Minero de España. <https://www.igme.es/>
- [50] SONINGEO S.L. (2021). AUDITORÍA ENERGÉTICA DE EDIFICIOS DEL GOBIERNO VASCO. Laboratorio de Control de Calidad en la edificación (Nº 20033).
- [51] IDAE. (2011a, mayo). Escala de calificación energética para edificios existentes. <https://www.idae.es/publicaciones/escala-de-calificacion-energetica-edificios-existentes>
- [52] PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (PVGIS). (2022). [Software]. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/
- [53] Ma Mercedes Cobo Urios. (2021, noviembre). Diseño y dimensionamiento de un sistema de geotermia somera para la ETSIAAB (TFG). UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. <https://oa.upm.es/69336/7/TFG MARIA MERCEDES COBO URIOS.pdf>
- [54] Ente Vasco de la Energía. (2020). Programa de ayudas a inversiones en instalaciones de aprovechamiento geotérmico. <https://www.eve.eus/CMSPages/GetFile.aspx?guid=1b1413a9-1cf9-491b-a24f-264ccd4bc5ea>
- [55] ENTE VASCO DE LA ENERGÍA. (2021, octubre). Aprobación, convocatoria y publicación de las bases reguladoras del programa de incentivos ligados al autoconsumo y al almacenamiento, con fuentes de energía renovable, así como a la implantación de sistemas térmicos renovables en el sector residencial, en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. BOLETÍN OFICIAL DEL PAÍS VASCO. <https://www.euskadi.eus/y22-bopv/es/bopv2/datos/2021/10/2105035a.pdf>

7 ANEXO I: DESCRIPCIÓN DE LAS TAREAS

Para poder conseguir los objetivos de la investigación se han desarrollado las siguientes tareas:

- **Tarea 0:** Coordinación y gestión del trabajo.
- **Tarea 1:** Estudio de la situación y reglamentos actuales de las BC.
- **Tarea 2:** Revisión bibliográfica de hibridación de tecnologías e instalaciones de BC.
- **Tarea 3:** Visita al edificio LCCE.
- **Tarea 4:** Obtención de datos reales de las instalaciones.
- **Tarea 5:** Analizar la metodología de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado.
- **Tarea 6:** Diseñar la posible instalación geotérmica y realizar el análisis económico y medioambiental del mismo.
- **Tarea 7:** Realizar un estudio de precio y características de la situación actual de las BC aerotérmica.
- **Tarea 8:** Diseñar la posible instalación aerotérmica sin tener en cuenta el apoyo de otra instalación térmica y realizar el análisis económico y medioambiental del mismo.
- **Tarea 9:** Diseñar la posible instalación aerotérmica teniendo en cuenta el apoyo de una caldera y realizar el análisis económico y medioambiental del mismo.
- **Tarea 10:** Redacción del documento de memoria del TFM
- **Tarea 11:** Obtención y redacción de conclusiones
- **Tarea 12:** Presentación oral del TFM

7.1 DIAGRAMA DE GANTT



Figura 7.1. Diagrama de Gantt de las tareas realizadas en el estudio



Se muestra en la Figura X el diagrama de Gantt considerando el desglose de las tareas previamente descritas. Cada tarea se vincula a un periodo de horas requerido para llevar a cabo el trabajo, en el que se han dedicado un total de 430 horas.

8 ANEXO II: DESCRIPCIÓN DEL PRESUPUESTO

En este apartado se recogen todos los desembolsos derivados del desarrollo de este trabajo, que se dividen en dos grupos: horas internas y gastos.

8.1 HORAS INTERNAS

La Tabla 8.1 muestra una estimación de las horas trabajadas por las personas implicadas en este trabajo.

Tabla 8.1. Costes de las horas internas

	Nº de horas	Coste por h [€/h]	Coste [€]
Directora	65	40	2.600
Alumna	430	15	6.450
TOTAL			9.050 €

8.2 GASTOS

Además de los costes de las horas internas también se han contemplado los gastos debido a la movilidad ya que tanto la directora como el alumno se han desplazado desde sus respectivos municipios al LCCE para realizar diferentes trámites o estudios. En la Tabla 8.2 se indican estos gastos de manera simplificada.

Tabla 8.2. Gastos

	Nº de viajes	Distancia [km/viaje]	por viaje	Coste [€/km]	por distancia	Coste [€]
Directora	5	124,8		0,6		374,4
Alumna	2	85,6		0,6		102,8
TOTAL						477,2 €