



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Máster

Estudio del comportamiento energético del  
edificio  
de la Facultad de Filosofía y Letras a partir de datos  
del sistema de monitorización  
Study of the energy performance of the Faculty of  
Philosophy and Humanities building based on  
monitoring system data

Autor

Inés Fraile Martín

Director

Ignacio Zabalza Bribián

Máster Universitario en Energías Renovables y Eficiencia Energética  
Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2025



## Resumen

En un contexto gobernado por la crisis climática y la crisis de suministros energéticos, la Universidad de Zaragoza asumió, en 2019, su compromiso con los objetivos de la Agenda 2030, adoptando medidas relacionadas con la sostenibilidad ambiental y alineadas con la reducción de gases de efecto invernadero (GEI). Este compromiso se materializa, desde entonces, en la aplicación de las normativas de eficiencia energética europeas y la integración de estrategias y tecnologías innovadoras en los sistemas de climatización de las nuevas construcciones y rehabilitaciones. En los nuevos edificios, resulta crucial monitorizar las variables que sean necesarias para evaluar el comportamiento real de las tecnologías de generación de energía ante diversas condiciones operativas. El presente Trabajo de Fin de Máster aborda el estudio energético del nuevo edificio de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Zaragoza durante su primer año de funcionamiento. El análisis se centra en los sistemas de generación de energía térmica, evaluando su funcionamiento. Se determina el porcentaje de cobertura que cada sistema aporta a la demanda energética total del edificio un mes de invierno y un mes representativo de verano.

**Palabras clave:** Eficiencia energética, Edificio de Consumo Casi Nulo, Energías Renovables

## **Abstract**

In a context governed by the climate crisis and the energy supply crisis, the University of Zaragoza assumed its commitment to the objectives of the 2030 Agenda in 2019, adopting measures related to environmental sustainability and aligned with the reduction of greenhouse gas emissions (GHG). Since then, this commitment has been materialized through the implementation of European energy efficiency regulations and the integration of innovative strategies and technologies into the climate control systems of new constructions and renovations. In new buildings, it is crucial to monitor the necessary variables to evaluate the actual performance of energy generation technologies under diverse operating conditions. This Master's Thesis focuses on the energy study of the new building of the Faculty of Philosophy and Humanities at the University of Zaragoza during its first year of operation. The analysis focuses on the thermal energy generation systems, evaluating their performance. The percentage of coverage that each system contributes to the building's total energy demand is determined for one winter month and one representative summer month.

**Keywords:** Energy efficiency, Near Zero Energy Building, Renewable Energy

# Índice general

<b>Resumen/Abstract</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación, Normativa y Filosofía de la Universidad de Zaragoza . . . . .	1
1.2. Objetivos del Trabajo de Fin de Máster . . . . .	3
1.3. Estructura del Trabajo . . . . .	4
<b>2. Descripción del Edificio y sus Instalaciones</b>	<b>5</b>
2.1. Descripción del Edificio . . . . .	5
2.2. Principales Instalaciones del Edificio . . . . .	10
2.2.1. Pozos Canadienses . . . . .	10
2.2.2. Generación Solar . . . . .	11
2.2.3. Bombas de Calor . . . . .	13
2.2.4. Enfriadora de Adsorción . . . . .	15
<b>3. Metodología</b>	<b>17</b>
3.1. Descripción General . . . . .	17
3.2. Modelado de las Principales Instalaciones . . . . .	19
3.2.1. Pozos Canadienses . . . . .	19
3.2.2. Bomba de Calor Agua-Agua . . . . .	20
3.2.3. Bomba de Calor Aire-Agua . . . . .	21
3.2.4. Generación solar . . . . .	21
<b>4. Análisis de Resultados</b>	<b>23</b>
4.1. Pozos Canadienses . . . . .	23

4.1.1. Funcionamiento Incorrecto . . . . .	23
4.1.2. Energía Aportada . . . . .	26
4.1.3. Los Pozos Canadienses como Laboratorio . . . . .	27
4.1.4. Condensación en los Conductos . . . . .	30
4.2. Bomba de Calor Agua-Agua . . . . .	31
4.2.1. Energía Aportada por la Bomba de Calor Agua-Agua . . . . .	31
4.2.2. Limitaciones del Estudio . . . . .	33
4.3. Generación solar . . . . .	34
4.3.1. Energía Aportada por el Sistema de Generación Solar . . . . .	34
4.3.2. Estudio de la Estratificación Térmica . . . . .	35
4.4. Bomba de Calor Aire-Agua . . . . .	36
4.5. Energía Consumida . . . . .	37
4.6. Aporte de Energía en Invierno y en Verano . . . . .	39
<b>5. Conclusiones</b>	<b>41</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>43</b>
<b>Anexo I</b>	<b>1</b>

# 1 | Introducción

## 1.1. Motivación, Normativa y Filosofía de la Universidad de Zaragoza

En la actualidad, se estima que los edificios terciarios y residenciales de la Unión Europea (UE) son responsables de, aproximadamente, el 40% del consumo de energía primaria y del 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Se sabe que la demanda de refrigeración aumentará en los próximos años como consecuencia del cambio climático, especialmente en los países de clima mediterráneo, por lo que se espera una tendencia creciente del consumo energético [1]. Es por ello que, desde 1993, la UE ha aprobado normativas para legislar en el ámbito de la eficiencia energética con el fin de reducir el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Entre todas estas normas, se encuentran las relativas al sector de la construcción que, en todo el mundo, es responsable del 33% de las emisiones de GEI.

La primera normativa relativa a la eficiencia energética en la UE se decretó en el año 1993 con la Directiva 93/76/CEE [2], por la que se limitan las emisiones de CO<sub>2</sub> a través de la mejora de la eficiencia energética en la edificación. Esta norma evolucionó hasta la Directiva 2002/91/UE [3], que estableció la obligación de poner a disposición de los usuarios un certificado de eficiencia energética que incluyera información sobre las características energéticas del edificio con el fin de promover la construcción de edificios de alta eficiencia y la inversión en ahorro de energía. En el año 2010 se presentó por primera vez el concepto de Edificio de Energía Casi Nula o NZEB (de sus siglas en inglés, *Near Zero Energy Building*). Paralelamente, en España se aprobó el Código Técnico de la Edificación (CTE) en el año 2006, a través del Real Decreto 314/2006 [4] y nació el Reglamento de Instalaciones Térmicas en la Edificación (RITE) en el 2007 según el RD 47/2007 [5], instrumentos creados para implantar las medidas de eficiencia energética en la edificación en España. Desde entonces, la normativa se ha actualizado y se han desarrollado sistemas de

referencia, certificación y planes nacionales que facilitan e incentivan el cumplimiento de las leyes establecidas. Las últimas actualizaciones de la normativa europea son la Directiva 2023/1791 [6] y la Directiva 2024/1275 [7], por las que se regula el papel ejemplarizante de los edificios públicos en materia de energía y por las que se introduce el concepto de Edificio de Cero Emisiones (ZEB, del inglés *Zero Emissions Building*) mientras que en España se han aprobado el Real Decreto 390/2021 [8], sobre las actualizaciones en la materia de certificados energéticos en la edificación y el Real Decreto 450/2022 [9], por el que se actualiza el documento básico en ahorro de energía del CTE (CTE-DB-HE). En las tablas 1.1 y 1.2 se resumen los principales cambios que introduce cada una de las normas.

1993	Directiva 93/76/CEE [2]	Limitación de emisiones de CO <sub>2</sub> mediante la mejora de la eficiencia energética.
2002	Directiva 2002/91/CE/EP/BD [3]	Fomento de la eficiencia energética de los edificios teniendo en cuenta las condiciones climáticas. Creación de los certificados de eficiencia energética.
2006	Directiva 2006/32/CE [10]	Fomento de la mejora rentable de la eficiencia del uso final de la energía.
2009	Directiva 2009/28/CE [11]	Fomento del uso de fuentes de energías renovables.
2010	Directiva 2010/31/UE [12] Directiva 2010/30/EU [13]	Los edificios públicos deberán ser de energía casi nula (2018). Fomento de productos de alta eficiencia a través de la regularización de la normativa y el etiquetado.
2012	Directiva 2012/27/CE [14]	Marco común de medidas para el fomento de la eficiencia energética dentro de la UE.
2018	Directiva 2018/844/UE [15] Directiva 2018/2002/UE [16]	Se habla de edificios inteligentes con sistemas de automatización. Establecimiento del objetivo de tener edificios de bajas emisiones en la UE.
2023	Directiva 2023/1791/UE [6]	Marco común de medidas para la reducción de la dependencia de las importaciones de energía. Se establece la función ejemplarizante del sector público en el ahorro de energía.
2024	Directiva 2024/1275/UE [7]	Definición de un nuevo estándar Edificios de Cero Emisiones (ZEB).

TABLA 1.1: *Evolución de la normativa europea en materia de eficiencia energética en la edificación.*

1999	Ley 38/1999 [17]	Nacimiento del CTE en la Ley de Ordenación de la Edificación.
2002	RD 314/2006 [4]	Aprobación del CTE.
2006	Directiva 2006/32/CE [18]	Aprobación del procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética. Aprobación del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE).
2009	RD 1826/2009 [19]	Modificación del RITE.
2011	ISO 50001/2011 [20]	Establecimiento de los requisitos de los Sistemas de Gestión de Energía.
2012	Directiva 2012/27/CE [21]	Establecimiento de un marco común de medidas para el fomento de la eficiencia energética dentro de la UE.
2013	RD 235/2013 [22] FOM 1635/2013 [23] RD 238/2013 [24]	Se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética. Actualización del Documento Básico DB HE «Ahorro de energía» del CTE. Actualización del RITE.
2017	RD 564/2017 [25]	Modificación del CTE (inclusión de los estándares de NZEB) Modificación de los criterios de certificación energética.
2019	RD 732/2019 [26]	Modificación del CTE.
2021	RD 390/2021 [8]	Actualización de la certificación eficiencia energética de los edificios.
2022	RD 450/2022 [9]	Actualización del CTE-DB-HE.

TABLA 1.2: *Evolución de la normativa española en materia de eficiencia energética en la edificación.*

En este contexto de transición energética y cambio climático, la Universidad de Zaragoza firmó en 2019 el compromiso de adherirse a la Agenda 2030 y de trabajar para lograr el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Organización de las Naciones Unidas en 2015 para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad de todos. Desde entonces, la Universidad ha integrado estas directrices en sus políticas, actividades

y, en general, en todos los proyectos desarrollados. En la figura 1.1 se muestran los ODS relacionados con el presente Trabajo de Fin de Máster (TFM). El compromiso se refleja en todas las acciones orientadas a fortalecer los tres pilares fundamentales de la sostenibilidad: económica, social y ambiental. En particular, en el ámbito de la sostenibilidad ambiental, en los últimos años se han implementado numerosas medidas dirigidas a reducir las emisiones de GEI y a garantizar el uso eficiente de las instalaciones, objetivos estrechamente vinculados con la construcción y la remodelación de los edificios universitarios.



FIGURA 1.1: *Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con el TFM.*

En lo relativo a la construcción de nuevos edificios universitarios, la Universidad de Zaragoza ha adoptado un enfoque que combina sostenibilidad, eficiencia y salud y que habiéndose aplicado por primera vez en el diseño y construcción del nuevo edificio de la Facultad de Filosofía y Letras, servirá como base de los proyectos venideros.

Los ejes fundamentales de la reconstrucción del edificio de la Facultad de Filosofía y Letras se resumen en los siguientes puntos:

- Reducción de la huella de carbono mediante el cumplimiento de la normativa europea de eficiencia energética, con el objetivo de alcanzar un edificio de energía casi nula y con la máxima calificación energética.
- Uso de materiales de bioconstrucción e incorporación de elementos que fomentan entornos saludables, como la presencia de vegetación en espacios interiores.
- Promoción de los certificados ambientales que avalan el diseño y la gestión sostenible de los edificios. El edificio espera conseguir el certificado BREEAM.
- Concepción del edificio como un laboratorio de investigación, en el que poner a prueba materiales, instalaciones y estrategias de eficiencia energética para que puedan o no ser replicados en otras construcciones de la Universidad según convenga.

## 1.2. Objetivos del Trabajo de Fin de Máster

El propósito de este TFM es analizar el comportamiento energético del nuevo edificio de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Zaragoza en su primer año de uso. Para ello,

se analizarán los datos que ofrece el sistema de monitorización del edificio.

Se establecen los siguientes objetivos concretos:

1. Elaborar un visor que permita analizar los datos de los equipos de climatización de forma sencilla a través de gráficas y tarjetas que proporcionen datos de interés para favorecer la optimización energética del edificio.
2. Cuantificar las variables de interés de las instalaciones, tales como los saltos térmicos o las horas de funcionamiento de cada sistema con el fin de determinar el aporte de energía de cada equipo de climatización a la demanda total del edificio en dos escenarios: un día típico de verano y un día típico de invierno.
3. Detectar, a través del estudio de los datos, posibles anomalías en el funcionamiento de los sistemas de generación de energía térmica.
4. Proponer estrategias para mejorar la gestión y la monitorización de los sistemas y del edificio en general para maximizar el rendimiento de las medidas de eficiencia energética y de los equipos.

### **1.3. Estructura del Trabajo**

El Trabajo está organizado como sigue: en la sección 2 se describe el edificio de la Facultad de Filosofía y Letras y se presentan los principales equipos de climatización. En la sección 3 se explica la metodología utilizada para desarrollar el estudio. En la sección 4 se detallan los resultados del Trabajo para los distintos equipos. Por último, en la sección 5 se comentan brevemente las líneas de investigación que abre este Trabajo y se desarrollan las conclusiones del estudio.

## 2 | Descripción del Edificio y sus Instalaciones

### 2.1. Descripción del Edificio

El edificio actual de la Facultad de Filosofía y Letras abarca una superficie total de 25.662 m<sup>2</sup>, distribuidos en tres bloques principales: el edificio central de la Facultad (11.024 m<sup>2</sup>), el nuevo edificio departamental (8.759 m<sup>2</sup>) y la Biblioteca María Moliner. Mientras que el edificio departamental (EDE) fue completamente reconstruido en el proyecto finalizado en 2023, el edificio central de la Facultad (EFL) experimentó una rehabilitación significativa. Por su parte, la Biblioteca María Moliner no requirió intervenciones, ya que es una construcción reciente cuya obra concluyó en 2001. El edificio EFL se divide a su vez en cuatro zonas: docencia, historia, geografía y el aula magna. En la figura 2.1 se muestran cada una de las partes del edificio.



FIGURA 2.1: Bloques del edificio de la nueva Facultad de Filosofía y Letras.  
Fuente: Visor del sistema.

En conjunto, los edificios EDE y EFL, sobre los que se realiza el estudio recogido en este Trabajo, acogen diariamente a 2.666 estudiantes y 341 trabajadores, distribuidos entre 10 titulaciones de grado, 11 programas de máster, 2 estudios propios y las oficinas administrativas de la Facultad.

El diseño del proyecto de reconstrucción y rehabilitación se centró en los siguientes ejes prioritarios: integración y continuidad volumétrica, organización y ordenación de las circulaciones, compacidad del edificio (factor de forma reducido) y diseño eficiente. Un aspecto clave en la fase de proyecto fue la transmitancia térmica de los elementos constructivos. La transmitancia térmica da cuenta de las pérdidas térmicas a través de estos componentes y, por tanto, una transmitancia térmica reducida contribuye a lograr una mayor eficiencia energética. Los valores logrados permiten minimizar las pérdidas de frío y calor en verano y en invierno respectivamente. Los valores de los elementos más relevantes (fachadas, cubiertas y ventanas) se presentan en la tabla 2.1.

TRANSMITANCIA TÉRMICA , $U$ ( $W/m^2 \cdot K$ )	
CERRAMIENTOS OPACOS	
Solera	0,12
Fachada principal (EDE)	0,21
Fachada principal (EFL)	0,34
Cubierta verde (EDE)	0,14
Cubierta transitable de grava	0,14
Cubierta transitable de grava	0,15
Tejado (EFL)	0,35
VENTANAS	
Muro cortina (EDE)	1,54
Ventanas (EDE)	(1,50-1,84)
Ventanas (EFL)	(1,40-1,57)

TABLA 2.1: Valores de la transmitancia térmica  $U$ , de los principales cerramientos opacos y de las principales ventanas del edificio.

Estos valores se encuentran dentro del rango permitido por la sección de limitación de la demanda energética del Documento Básico de Ahorro de Energía del CTE (CTE-DB-HE1), cuyo objetivo es establecer límites a los valores clave en el diseño de los elementos constructivos para garantizar que la envolvente térmica del edificio (muros, cubiertas, ventanas, etc.) esté diseñada de manera eficiente, minimizando el consumo energético asociado a la calefacción, la refrigeración y la ventilación, mientras se mantiene el confort térmico. Los valores límite se muestran en la figura 2.2. Zaragoza pertenece a la zona climática D en invierno.

Tabla 3.1.1.a - HE1 Valores límite de transmitancia térmica,  $U_{lim}$  [ $W/m^2K$ ]

Elemento	Zona climática de invierno					
	$\alpha$	A	B	C	D	E
Muros y suelos en contacto con el aire exterior ( $U_s, U_M$ )	0,80	0,70	0,56	0,49	0,41	0,37
Cubiertas en contacto con el aire exterior ( $U_c$ )	0,55	0,50	0,44	0,40	0,35	0,33
Muros, suelos y cubiertas en contacto con espacios no habitables o con el terreno ( $U_T$ ) Medianerías o particiones interiores pertenecientes a la envolvente térmica ( $U_{MD}$ )	0,90	0,80	0,75	0,70	0,65	0,59
Huecos (conjunto de marco, vidrio y, en su caso, cajón de persiana) ( $U_H$ )*	3,2	2,7	2,3	2,1	1,8	1,80
Puertas con superficie semitransparente igual o inferior al 50%	5,7					

\*Los huecos con uso de escaparate en unidades de uso con actividad comercial pueden incrementar el valor de  $U_H$  en un 50%.

FIGURA 2.2: Valores límite de la transmitancia térmica de diferentes elementos constructivos para las distintas zonas climáticas.

El sistema de climatización se divide entre el sistema primario y el sistema secundario. En la figura 2.3 se muestra el esquema simplificado del sistema primario de climatización. Se representan los principales equipos de generación de energía térmica, los intercambiadores de calor, las bombas de impulsión y los flujos de energía. El esquema detallado se presenta en el Anexo I.

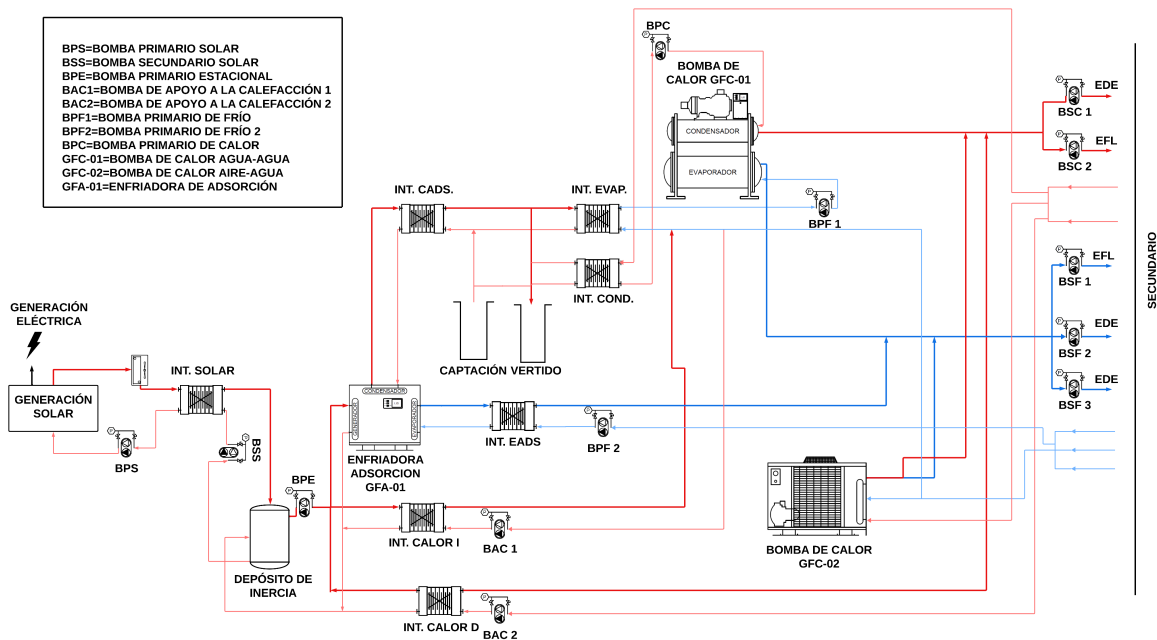


FIGURA 2.3: Esquema simplificado del sistema primario de climatización del edificio de la Facultad de Filosofía y Letras.

1. Los paneles PVT generan electricidad y calor. La electricidad generada por los paneles se utiliza para nutrir los distintos equipos eléctricos del edificio. El flujo de calor producido por los colectores alimenta un depósito de inercia con una capacidad de  $70 \text{ m}^3$ , que permite flexibilizar la gestión de la energía térmica según la producción y la demanda del edificio

en cada momento.

2. El calor almacenado en el depósito tiene dos propósitos. En verano, alimenta una enfriadora de adsorción para la producción de frío. En invierno, dependiendo de la temperatura del agua almacenada, el depósito se utiliza para aumentar la temperatura del foco frío con el que interactúa la bomba de calor agua-agua con el fin de aumentar su rendimiento energético o bien, se utiliza para calentar el agua del retorno.
3. La bomba de calor agua-agua (bomba GFC-01) trabaja intercambiando calor con el agua del freático a través de los pozos de captación y vertido.
4. Se tiene una bomba de calor aire-agua cuyo foco térmico es el aire exterior (bomba GFC-02), que se utiliza para modular. Este equipo solo se activa ante demandas pequeñas de climatización.
5. Las bombas de calor y el resto de sistemas eléctricos del edificio se nutren de la energía producida por los paneles fotovoltaicos (PV) y en menor medida por los paneles PVT. Esto permite reducir la necesidad de importar energía de la red.

El esquema simplificado del sistema secundario de climatización se muestra en la figura 2.4. Se representan los elementos fundamentales del sistema y los flujos de aire (impulsión, en negro, retorno, en naranja y la expulsión al exterior en rojo).

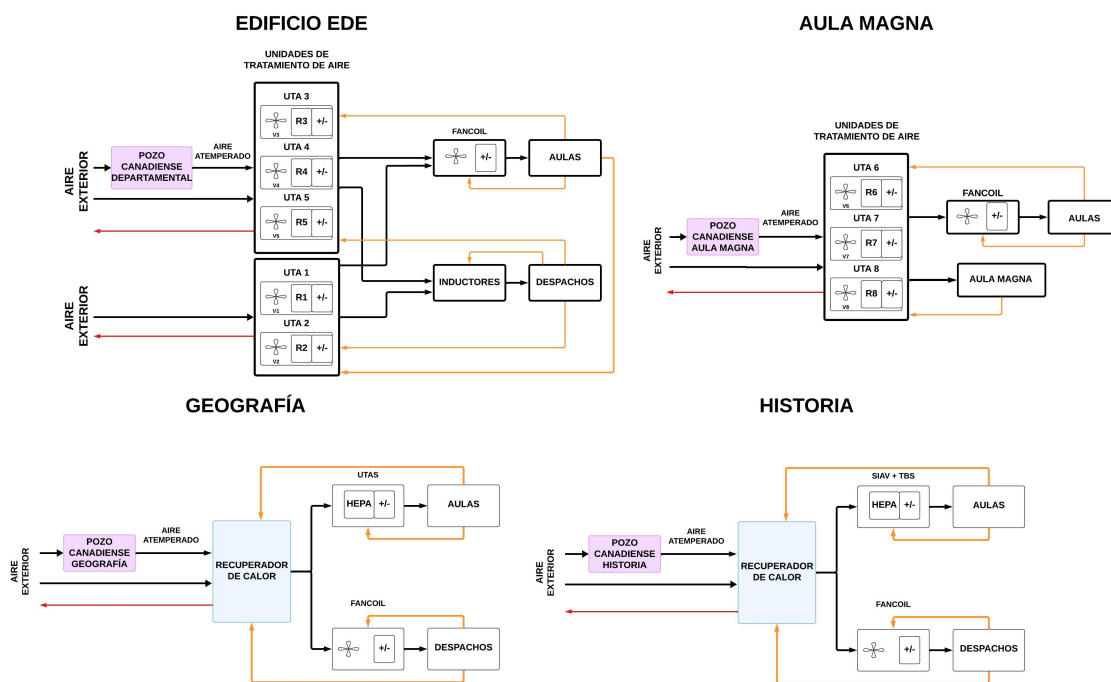


FIGURA 2.4: Esquema simplificado del sistema secundario de climatización del edificio de la Facultad de Filosofía y Letras.

El sistema secundario de climatización es distinto para cada una de las cuatro partes diferenciadas del edificio. Se explica como sigue:

- 1. Edificio Departamental.** Existen cinco unidades de tratamiento de aire (UTAs) dotadas, cada una de ellas, de tres componentes esenciales: un ventilador, un recuperador de calor ( $R_i; i = (1, \dots, 8)$ ) y una batería de calor o frío (representada en la figura 2.4 como +/-) conectada al sistema primario. Estos elementos permiten realizar un primer tratamiento térmico del aire antes de introducirlo a los distintos espacios aumentando la eficiencia energética del sistema. Los recuperadores de calor de todas las instalaciones son rotativos y por tanto, entálpicos (recuperan tanto temperatura como humedad). A las UTAs 3, 4 y 5 se introduce aire desde la instalación de pozos canadienses del EDE (aire atemperado previamente) o bien desde el exterior, según convenga en cada situación. Las UTAs 1 y 2 solo reciben el aire del exterior. Las baterías de las UTAs calientan o enfrían el aire inyectado en invierno o verano respectivamente. El aire termina de atemperarse en las unidades terminales (fan coils en las aulas e inductores en los despachos) y se inyecta en los espacios que deben acondicionarse. Parte del aire de los despachos y de las aulas retorna a las UTAs y parte a las unidades terminales.
- 2. Aula Magna.** El aire del exterior puede acceder directamente a las unidades de tratamiento de aire (UTAs 5, 6 y 7) o introducirse una vez se haya atemperado en la instalación de pozos canadienses correspondiente al Aula Magna. Las UTAs constan de los mismos elementos que en el caso del edificio EDE. El aire tratado se inyecta directamente, a través de las UTAs, en el Aula Magna. Esta instalación da soporte también a las aulas del bloque. En ese caso el aire se termina de atemperar y se distribuye a través de fan coils, después, una parte retorna a las UTAs y otra a las unidades terminales.
- 3. Geografía e Historia.** El aire del exterior puede acceder directamente a los recuperadores de calor o puede introducirse una vez se haya atemperado en las instalaciones de pozos canadienses de los módulos de Geografía y de Historia. El aire atemperado llega a la temperatura de consigna y se distribuye en las unidades terminales. En este caso, se tienen UTAs que incorporan filtros HEPA (por sus siglas en inglés, *High Efficiency Particulate Air*) para garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad de aire interior. También se distribuye el aire atemperado a los despachos a través de fan coils. El aire del interior retorna, en parte, a los fan coils o al conjunto SIAV+TBS, y en parte a los recuperadores de calor para reducir el salto térmico con el aire del exterior y aumentar la eficiencia energética del sistema en conjunto.

## 2.2. Principales Instalaciones del Edificio

### 2.2.1. Pozos Canadienses

Una instalación de pozos canadienses consiste en un conjunto de conductos enterrados a cierta profundidad por los que se hace circular aire del exterior. El objetivo de la tecnología es atemperar el aire, a través del intercambio de calor con el terreno, antes de introducirlo al interior de un edificio aprovechando la inercia térmica del suelo. Se pretende con esto reducir la demanda energética asociada a la calefacción y a la refrigeración del edificio, puesto que su consumo eléctrico es menor que el asociado a otros sistemas de climatización. Además, es posible incorporar recuperadores de calor que aumentan el salto térmico aprovechando el calor residual del aire de expulsión. Son diversos los factores que deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar una instalación de estas características. Escoger los valores óptimos de las variables relacionadas con el terreno, la configuración de la instalación, los materiales de los conductos y la localización geográfica del sistema es un factor clave para lograr un alto rendimiento de este tipo de sistemas.

En los últimos años, los pozos canadienses han emergido como una solución eficiente y sostenible, adoptada exitosamente en el diseño de grandes edificios. El Centro de Incubación Empresarial de Milla Digital (CIEM) es el primer edificio de consumo casi nulo de titularidad municipal en la ciudad de Zaragoza. Este edificio incorpora un sistema de tubos subterráneos para el pre-acondicionamiento del aire que se distribuye a sus espacios interiores. García Ballano et al. [27] describieron en detalle los sistemas y el funcionamiento básico del edificio en relación con las condiciones meteorológicas externas, analizando durante tres años consecutivos el comportamiento de esta tecnología. Sus estudios confirmaron el funcionamiento óptimo del sistema. El edificio LUCIA, perteneciente a la Universidad de Valladolid, es otro de los edificios que ha incorporado satisfactoriamente esta tecnología de energía renovable. La combinación de este y otros sistemas ha permitido que el edificio alcance la categoría de nZEB y de balance cero en emisiones de CO<sub>2</sub>. Al igual que el nuevo edificio de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Zaragoza, el edificio LUCIA está pensado para ser un edificio-laboratorio [28] en el que probar tecnologías y estrategias de gestión novedosas y sostenibles. El nuevo edificio de la Facultad de Filosofía y Letras es el primer edificio de la Universidad de Zaragoza que incorpora la tecnología de tubos canadienses. Las características de las cuatro instalaciones presentes en el edificio son las siguientes:

- Hay 4 instalaciones que dan soporte al edificio: el conjunto de tubos del módulo de Historia, el del módulo de Geografía, una instalación para el Aula Magna y una instalación de mayor potencia en el Edificio Departamental.
- Todas las instalaciones se han diseñado bajo la premisa de servir como laboratorio de investigación. Es por ello que se han elegido tres materiales distintos (hormigón, PVC negro

y PVC rojo) para probar el rendimiento de cada uno de ellos. La conductividad térmica del hormigón toma valores de entre 0,8 y 1,9 W/m·K, mientras que el PVC tiene una conductividad de 0,17 W/m·K.

- La configuración de todas ellas es el sistema Tichelmann (numerosos conductos enterrados situados en rejilla), que permite el paso de caudales elevados y es por eso que es la configuración elegida en grandes edificios.
- El terreno juega un papel fundamental en el intercambio de calor. Para favorecer la transferencia, el suelo se enriqueció con arcillas que mejoran la conductividad térmica y favorecen la acumulación de humedad.
- Las instalaciones se encuentran enterradas a una profundidad de entre 6 y 10 metros, puesto que se ha visto que las capas superficiales son las que mejoran el rendimiento de estos sistemas al estar altamente influenciadas por las condiciones meteorológicas externas.

En la tabla 2.2 se muestran las características más representativas de las 4 instalaciones: materiales de los conductos, longitud de los tubos, número de conductos, área total de intercambio de calor y caudal total de aire que puede circular en cada instalación.

Pozo	1. EDE	2. HISTORIA	3. AULA MAGNA	4. GEOGRAFÍA
Tipo de conducto	Hormigón, PVC rojo y PVC negro	PVC rojo y PVC negro	Hormigón, PVC rojo y PVC negro	PVC rojo y PVC negro
Longitud (m)	43,82	26,45	23,73	28,23
Número de conductos	28	14	21	14
Área de intercambio térmico total (m <sup>2</sup> )	1.083,50	330,15	10.294,00	6.404,00
Caudal total (m <sup>3</sup> /h)	13.530,00	6.404,00	437,83	350,37

TABLA 2.2: Características de las instalaciones de pozos canadienses del edificio de la Facultad de Filosofía y Letras.

### 2.2.2. Generación Solar

En los últimos años, las placas fotovoltaicas se han consolidado como uno de los recursos energéticos más utilizados para proporcionar energía renovable in-situ en edificios [29]. Estas placas están compuestas por un conjunto de células fotovoltaicas que generan electricidad aprovechando la irradiancia solar. Se ha comprobado que su rendimiento energético decae con el aumento de temperatura de los módulos. En la Universidad de Zaragoza existen 15 instalaciones de este tipo distribuidas en las azoteas de diversos edificios con las cuales se ha logrado cubrir, aproximadamente, el 5% de la demanda eléctrica total de la Universidad. Otra tecnología que genera energía, en este caso térmica, aprovechando la irradiancia solar son los paneles solares térmicos

que se utilizan para climatizar espacios de un edificio, o bien para cubrir la demanda de agua caliente sanitaria (ACS) [30]. Un panel solar híbrido es una tecnología basada en la combinación de módulos fotovoltaicos y colectores térmicos que hace posible la producción simultánea de energía eléctrica y de calor. Generalmente, los paneles PVT están formados por una lámina fotovoltaica, un intercambiador de calor, conductos por los que circula el fluido caloportador y una lámina de aislamiento térmico. Esta combinación no solo optimiza el uso del espacio disponible en las azoteas, sino que también mejora la eficiencia global del sistema. Esto se debe a que el colector térmico absorbe el calor de la placa, lo que impide que la temperatura elevada afecte negativamente al rendimiento del módulo fotovoltaico [31].

El edificio de la Facultad de Filosofía y Letras es el primero de la Universidad que incorpora esta tecnología en una de las azoteas. Los paneles PVT producen agua caliente que en los meses de invierno se aprovecha para cubrir parte de la demanda de calefacción del edificio. En verano se almacena en el depósito estacional para la producción de frío mediante un equipo de adsorción. El almacenamiento permite conseguir contribuciones solares notablemente mayores debido a su disponibilidad en cualquier momento del año. La instalación de paneles PVT junto al depósito de inercia se concibió en el proyecto para cubrir entre el 42% y el 52% de la demanda total de calor del edificio. El depósito de inercia estaba diseñado para ocupar un volumen de 300 m<sup>3</sup> bajo el *hall* principal del edificio. El tanque instalado finalmente tiene un volumen de 70 m<sup>3</sup>. Las características generales de la instalación de paneles PVT se resumen en la tabla 2.3.

Modelo	Potencia Instalada (Wp)	Número de Paneles
aH-72 SK 350 W (Abora Solar)	39.200	112

TABLA 2.3: Características generales de los paneles PVT instalados en el edificio de la Facultad de Filosofía y Letras.

El edificio cuenta también con dos instalaciones (98 módulos en total) de placas PV en modalidad de autoconsumo con vertido cero que suministran energía eléctrica al edificio y a los equipos de climatización que la requieren, reduciendo la necesidad de importar energía de la red eléctrica. La potencia total instalada es de 44.590 Wp. Las características de las dos instalaciones se muestran en la tabla 2.4.

	Modelo	Potencia Instalada (Wp)	Número de Paneles
Instalación I	AS-6M144-HC 455W	25.480	56 paneles
Instalación II	AS-6M144-HC 455W	19.110	42 paneles

TABLA 2.4: Características generales de los paneles PV instalados en el edificio de la Facultad de Filosofía y Letras.

La instalación de cogeneración solar, formada por los paneles PVT y el depósito de inercia, contribuye a mejorar el rendimiento de la bomba de calor agua-agua. El calor acumulado se extrae

cuando es necesario para aumentar la temperatura del foco térmico de la bomba. Asimismo, los paneles PV proporcionan energía eléctrica a este equipo, a la bomba de calor aire-agua, a las bombas de impulsión de los sistemas primario y secundario de climatización y a otros elementos que demandan energía eléctrica en el edificio (ventiladores, iluminación, etc.)

Este tipo de instalaciones han sido estudiadas y aplicadas previamente en otros edificios educativos de Europa, demostrando su potencial para lograr climatizar grandes edificios de forma sostenible y eficiente. Muntean et al. [1] simularon el comportamiento de un sistema de cogeneración solar, basado en la integración de paneles fotovoltaicos y una bomba de calor aire-agua, en el edificio de la Facultad de Construcción de Timisoara. Sus resultados mostraron que la combinación de estas tecnologías no solo permite reducir simultáneamente los costes de energía eléctrica y térmica, sino que también mejora significativamente el rendimiento global del sistema.

### 2.2.3. Bombas de Calor

Una bomba de calor es una máquina térmica que transfiere calor de un foco térmico a otro medio desarrollando un ciclo frigorífico [32]. Consiste en un circuito básico formado por un compresor, un sistema de expansión y dos intercambiadores de calor (compresor y evaporador). En este sistema, se aprovecha la energía calorífica cedida por el condensador para calentar el ambiente interior. El accionamiento del compresor puede ser eléctrico o térmico. La activación eléctrica es la más habitual en la actualidad, puesto que permite un control preciso de la operación de la máquina. En este caso, el compresor recibe electricidad de la red o de fuentes de energía *in-situ* para comprimir el fluido de trabajo. El accionamiento térmico se efectúa a través de fuentes de energía térmica, habitualmente, convencionales. La activación se produce a través de un ciclo termodinámico. Este modo de activación proporciona un menor control del sistema y conlleva un mantenimiento y una operación más complejos y costosos. Si la bomba de calor es reversible, se aprovecha también la energía absorbida por el evaporador para refrigerar el ambiente interior [33]. La inversión de la bomba, que permite la producción de frío en verano y de calor en invierno, puede efectuarse en el lado del refrigerante (más comúnmente) o en el lado del agua (este caso es común en las bombas de calor agua-agua). En el lado del refrigerante la inversión se realiza con una válvula de cuatro vías. Si la inversión se hace del lado del agua, entonces se realiza haciendo uso de válvulas o de intercambiadores de calor. Así pues, el objetivo de la bomba de calor es mantener un edificio a una temperatura adecuada, ya sea proporcionando calor en invierno o proporcionando frío en verano. Según el foco térmico, se distinguen tres tipos de bombas de calor [34]:

1. **Bombas de calor aerotérmicas.** El intercambio de calor se efectúa con el aire ambiente.
2. **Bombas de calor hidrotérmicas.** El foco térmico es agua de mares, ríos o lagos.

### 3. Bombas de calor geotérmicas. El intercambio de calor se realiza con el terreno.

Las bombas de calor hidrotérmicas pueden ser del tipo agua-aire o del tipo agua-agua. La diferencia entre ellas reside en el medio que actúa como sumidero. Este tipo de bomba de calor, en general, presenta valores elevados de rendimiento energético nominal gracias a las características térmicas del agua, que ofrece ventajas frente al aire para la operación de este tipo de sistemas. Las bombas de calor agua-agua se caracterizan por ofrecer gran controlabilidad y adaptabilidad ante distintas situaciones de operación. Por su parte, las bombas de calor aerotérmicas pueden ser del tipo aire-aire o agua-aire, según el medio que actúa como sumidero. Se caracterizan por la simplicidad de operación del sistema y por tener un menor impacto ambiental frente a otras tecnologías convencionales que pueden ofrecer el mismo servicio [35].

En los últimos años, las bombas de calor se han convertido en una de las tecnologías más utilizadas para cubrir las demandas de los edificios consiguiendo ahorros energéticos, logrando reducir el impacto ambiental de las instalaciones de climatización y consiguiendo, además, ahorros económicos. Son numerosos los estudios que se han desarrollado sobre esta tecnología en el sector residencial. Asae et al. [36] estudiaron la integración de una bomba de calor aire-agua para cubrir las demandas de climatización de un parque de viviendas en Canadá y estimaron que las emisiones de GEI podían reducirse hasta un 23% con el uso de este sistema frente al uso de fuentes de energía convencionales. Asimismo, se logró una reducción máxima del 36% del consumo de energía. Se ha comparado el rendimiento de los distintos tipos de bombas de calor en la bibliografía, encontrando que, generalmente, las bombas de calor que utilizan agua como foco térmico presentan mayores valores de *COP* (del inglés, *Coefficient of Performance*) frente a las bombas aerotérmicas [37]. Se ha probado la integración de la tecnología en edificios educativos. Kassai et al. [38] estudiaron la tecnología en un edificio universitario de Tiszagyenda desde el punto de vista de los impactos económico, ambiental y energético y comprobaron que se reducían todos ellos frente a la posibilidad de usar calderas de gas.

La ciudad de Zaragoza cuenta con más de 60 instalaciones de bombas de calor hidrotérmicas, superando los 120 MW de potencia instalada. Esto se debe a su situación privilegiada sobre el acuífero del río Ebro, que permite proveer a las instalaciones de elevados caudales de agua a temperatura estable durante todo el año [39]. La Universidad de Zaragoza ya cuenta con 7 instalaciones de este tipo, siendo la última la del edificio objeto del estudio.

En el edificio de la Facultad de Filosofía y Letras se cuenta con dos instalaciones de bomba de calor. Una de ellas, la bomba de calor agua-agua, intercambia calor con el agua del freático. También se cuenta con una bomba de calor aire-agua. La bomba hidrotérmica está pensada para ser el principal equipo de climatización del edificio, mientras que la aerotérmica cubre, aproximadamente, un cuarto de la demanda del edificio y está pensada únicamente para modular. En la tabla 2.5 se muestran los valores característicos de las dos instalaciones.

Tipo	Potencia frigorífica (kW)	Potencia calorífica (kW)	COP nominal	EER nominal
Agua-agua	903,80	1.160,00	4,91	5,59
Aire-agua	301,90	231,30	3,09	2,61

TABLA 2.5: Características generales de las bombas de calor instaladas en el edificio de la Facultad de Filosofía y Letras.

Se sabe que si la temperatura del foco frío de un ciclo termodinámico de bomba de calor aumenta, se puede reducir su consumo eléctrico. Es por ello que resulta interesante combinar esta tecnología con colectores solares térmicos, de modo que los paneles ceden calor al foco frío y se consigue aumentar el rendimiento energético del sistema en su conjunto. Esta situación es incluso más favorable si los paneles instalados son híbridos, de modo que la generación fotovoltaica cubre parte del consumo eléctrico de la bomba, reduciendo la demanda de la red. Con la hibridación de estas tecnologías se esperan, teóricamente, rendimientos considerablemente más altos que en una bomba convencional [32]. El sistema de climatización del edificio de la Facultad de Filosofía y Letras incorpora paneles PVT que transfieren calor a un depósito de inercia que puede ceder calor al foco con el que intercambia calor la bomba agua-agua cuando conviene.

#### 2.2.4. Enfriadora de Adsorción

Se ha estimado que en los próximos años la tendencia de la demanda de refrigeración va a ser creciente. No solo debido al calentamiento global, sino también a que cada vez más industrias demandan frío para poder desarrollar sus actividades [40]. Ello demuestra claramente la necesidad de buscar tecnologías de refrigeración alternativas, que incluyen la refrigeración por adsorción. El uso de ciclos de adsorción para enfriar edificios debe verse como una oportunidad para reducir el consumo de energía primaria no renovable y la huella de carbono asociada.

Las máquinas de adsorción se basan en un proceso físico-químico consistente en la adsorción de un fluido refrigerante por parte de un material adsorbente. El proceso que realizan estas máquinas se divide en tres etapas fundamentales:

1. **Evaporación del refrigerante.** El refrigerante (habitualmente agua) se evapora en el evaporador, extrayendo calor del circuito de agua del edificio.
2. **Adsorción del refrigerante.** El vapor de agua generado es adsorbido por el material adsorbente. Este proceso es exotérmico y libera calor, que se disipa mediante un sistema de refrigeración.
3. El material adsorbente se regenera mediante la aplicación de calor para liberar el refrigerante, permitiendo que este reinicie el ciclo en el evaporador.

Las máquinas de adsorción se utilizan actualmente para refrigerar grandes edificios (hoteles, bloques de viviendas u hospitales, por ejemplo) y pueden adaptarse a distintas configuraciones. Estas máquinas pueden utilizar el calor residual de las industrias para generar frío, pero también pueden acoplarse a sistemas de colectores térmicos, aprovechando el flujo de calor generado para refrigerar el interior de un edificio.

La máquina de adsorción del edificio de la Facultad de Filosofía y Letras se nutre del calor generado por los paneles PVT a través del depósito de inercia. Como se ha explicado, este sistema está pensado para operar, sobre todo, en los meses de verano. En esos meses el calor producido excede las necesidades térmicas del edificio y puede aprovecharse para producir frío. Sin embargo, en el primer año de funcionamiento del edificio este sistema no se ha utilizado. La máquina de adsorción instalada tiene una potencia térmica de 50 kW.

## 3 | Metodología

### 3.1. Descripción General

La metodología según la cual se ha desarrollado el estudio energético del edificio de la Facultad de Filosofía y Letras se puede resumir en los puntos que siguen. En la figura 3.1 se ha esquematizado los pasos que se han seguido.



FIGURA 3.1: Esquema de la metodología seguida para desarrollar el estudio.

1. Análisis y reconocimiento general del edificio, de los sistemas instalados y de los principios de gestión y funcionamiento. Conocimiento también de los fallos detectados por el equipo de mantenimiento de la Universidad en el funcionamiento del edificio y de los equipos.
2. Descarga de los datos de los equipos del sistema de gestión avanzada basado en tecnología SCADA (del inglés *Supervisory Control and Data Acquisition*) del edificio. Este sistema centraliza y almacena datos obtenidos en tiempo real desde una red de sondas que facilitan datos de temperaturas, caudales y otras variables de interés. Concretamente, se descargan los datos que se enumeran a continuación para cada equipo:
  - **Pozos canadienses.** Para cada una de las cuatro instalaciones se obtienen los datos horarios de temperatura del aire exterior, temperatura a la salida de cada tubo y temperatura del retorno de las UTAs. Para la instalación de pozos del edificio Departamental, se tienen además, valores de la humedad relativa del aire medidos en el exterior, en el interior del edificio y a la salida del propio conducto.

- **Bomba de calor agua-agua.** Se obtienen los datos de temperatura de captación del agua del freático, temperatura de inyección del agua del freático y caudal instantáneo. Todos los datos se actualizan cada 15 minutos. Además, se tienen datos horarios de las temperaturas de impulsión y retorno del condensador y del evaporador.
  - **Bomba de calor aire-agua.** Se tienen las temperaturas de impulsión y retorno del condensador y del evaporador. Se trata, en este caso de datos quinceminutales.
  - **Depósito de inercia.** Se dispone de valores de temperaturas del tanque proporcionados por cuatro sondas situadas a diferentes alturas del depósito. Los datos se actualizan cada hora.
  - **Paneles híbridos.** Se dispone de los datos horarios de temperaturas de impulsión y retorno del fluido caloportador de los paneles.
3. Tratamiento y visualización de los datos. Los datos se descargan como archivos CSV que se tratan en Excel para poder trabajar con ellos. Se calculan en Excel también las variables de interés de cada equipo. En cada caso:
- **Pozos canadienses** Se determina el salto térmico de cada tubo y la energía transferida desde el terreno. Para la instalación de pozos del edificio Departamental se determina si se produce o no condensación.
  - **Bomba de calor agua-agua.** Se obtienen las horas de funcionamiento y la energía térmica captada del agua del freático. También se calcula el aporte de potencia térmica calorífica y de refrigeración en invierno y verano respectivamente.
  - **Bomba de calor aire-agua.** Se obtiene la energía aportada por el sistema tanto en modo calefacción como en modo refrigeración.
  - **Depósito de inercia.** Se obtiene el calor almacenado cada hora y el calor cargado o descargado. Se determinan las horas del año en las que el depósito se carga y las horas en las que se descarga.
  - **Paneles PVT.** Se obtiene el aporte de calor que proporciona la instalación.

Una vez se han tratado los datos y se han obtenido las variables de interés, se importan las hojas de Excel a Power BI para proceder a la visualización gráfica de los datos y para poder obtener resultados numéricos que den cuenta del funcionamiento de los sistemas y de la energía aportada al edificio en dos escenarios que dependen de las temperaturas externas. Se eligen un día de temperaturas extremas de verano y un día de temperaturas extremas de invierno. El visor se ha elaborado para ofrecer una visión general de todos los equipos de climatización instalados en el edificio y puede actualizarse incorporando nuevos datos fácilmente.

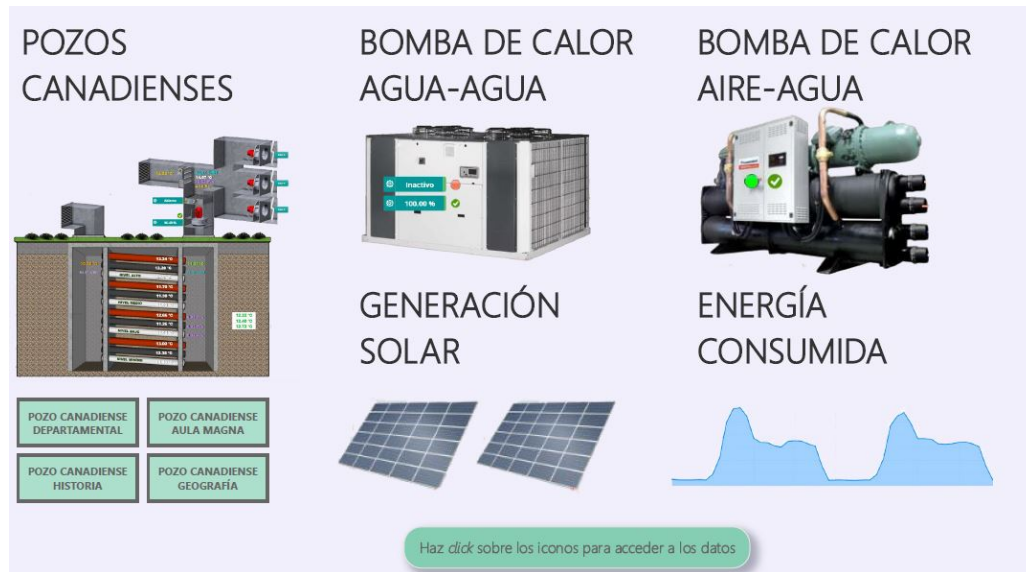


FIGURA 3.2: Menú del visor elaborado para la visualización de datos de los equipos de climatización del edificio de la Facultad de Filosofía y Letras.

4. Análisis de resultados y conclusiones. Los resultados se comparan con los datos teóricos esperados y se contrasta la información con aquella proporcionada por la Unidad Técnica de Construcciones y Energía de la Universidad, quien se encarga del mantenimiento del edificio y quien, por tanto, conoce las anomalías detectadas tanto en los sistemas de climatización como en los equipos de toma y recepción de datos.
5. Se analiza la curva de energía eléctrica consumida facilitada por la distribuidora en varios escenarios con el fin de conocer el consumo anual y el *stand-by* del edificio.

## 3.2. Modelado de las Principales Instalaciones

### 3.2.1. Pozos Canadienses

El intercambio de energía viene gobernado por las ecuaciones de transferencia de calor sensible. Así, el calor transferido al aire a través del tubo canadiense viene dado por la ecuación 3.1.

$$\dot{Q}_{sensible} = \dot{m}_{aire} \cdot C_{p,aire} \cdot (T_{aire,salida} - T_{aire,entrada}) \quad (3.1)$$

Donde  $\dot{Q}_{sensible}$  es el calor sensible intercambiado entre el aire y el terreno,  $\dot{m}_{aire}$  es la masa de aire que circula por el conducto,  $C_{p,aire}$  es la capacidad calorífica del aire,  $T_{aire,salida}$  es la temperatura del aire a la salida del intercambiador y donde  $T_{aire,entrada}$  es la temperatura del aire exterior.

La masa de aire por unidad de tiempo la obtendremos a través del caudal de aire ( $\dot{v}_{aire}$ ) y de su

densidad ( $\rho_{aire}$ ), considerando ésta constante y de valor igual a  $1,2 \text{ kg/m}^3$  (ecuación 3.2).

$$\dot{m}_{aire} = \rho_{aire} \cdot \dot{v}_{aire} \quad (3.2)$$

Debido a la dificultad para monitorizar el caudal de aire de entrada a los conductos, se ha considerado el caudal nominal de los ventiladores de cada una de las instalaciones. Se puede considerar una buena primera estimación puesto que las 4 instalaciones cuentan con dos ventiladores de impulsión de aire y tan solo se está utilizando uno en todas ellas, que trabaja a carga nominal constantemente.

Para la instalación de pozos canadienses del edificio Departamental se tienen también los valores de la humedad relativa del aire exterior, del aire interior y del aire a través del conducto. Con ello, es posible analizar el riesgo de condensación del aire en los tubos y estimar el calor latente, asociado a la condensación o a la evaporación de agua en el aire. Cuando el aire se enfría en los pozos canadienses, puede ocurrir que el vapor de agua condense, liberando calor latente.

La ecuación 3.3 muestra la relación general para el cálculo del calor latente.

$$\dot{Q}_{latente} = \dot{m}_{aire} \cdot \Delta x \cdot L \quad (3.3)$$

Donde  $\dot{Q}_{latente}$  es la potencia térmica latente,  $\dot{m}_{aire}$  es el caudal másico de aire que recorre el tubo,  $\Delta x$  es la variación de la humedad absoluta y donde  $L$  es el calor latente de vaporización del agua. La humedad absoluta viene dada por la ecuación 3.4, donde  $x$  es la humedad absoluta y  $p_v$  y  $p_{atm}$  es la presión parcial del vapor de agua y la presión atmosférica respectivamente.

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_v}{p_{atm} - p_v} \quad (3.4)$$

La presión parcial del vapor de agua se determina según la ecuación 3.5.

$$p_v = HR \cdot p_{sat}(T) \quad (3.5)$$

donde  $HR$  es la humedad relativa y donde  $p_{sat}(T)$  es la presión de saturación del vapor a la temperatura  $T$ .

La variación de la humedad absoluta  $\Delta x$  es entonces la diferencia entre la humedad absoluta de entrada al tubo  $x_{in}$  y la humedad absoluta de salida del tubo  $x_{out}$ .

### 3.2.2. Bomba de Calor Agua-Agua

Es posible conocer la energía extraída del agua del freático a través de la ecuación 3.6, donde  $\dot{Q}_{pozo}$  es la potencia térmica que proporciona el agua del freático,  $\dot{m}_{agua}$  es la masa de agua captada por unidad de tiempo,  $C_{agua}$  es la capacidad calorífica del agua, que en este caso se ha considerado constante e igual a  $4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ ,  $T_{iny}$  es la temperatura con la que se devuelve el agua al subsuelo y  $T_{cap}$  es la temperatura del agua en el pozo de captación.

$$\dot{Q}_{pozo} = \dot{m}_{agua} \cdot C_{agua} \cdot (T_{iny} - T_{cap}) \quad (3.6)$$

El caudal másico  $\dot{m}_{agua}$  se calcula según la ecuación 3.7, donde la densidad del agua ( $\rho_{agua}$ ) se considera constante e igual a  $997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  y donde el caudal volumétrico ( $\dot{v}_{agua}$ ) se toma del sistema de monitorización de datos.

$$\dot{m}_{agua} = \rho_{agua} \cdot \dot{v}_{agua} \quad (3.7)$$

Para calcular el aporte de energía térmica de la bomba de calor agua-agua al conjunto de climatización del edificio es necesario conocer la potencia térmica proporcionada por el condensador en invierno y la potencia térmica de refrigeración proporcionada por el evaporador de la bomba en verano. Se calculan según la ecuación 3.8, usando las temperaturas de impulsión y de retorno del condensador y del evaporador respectivamente. La capacidad calorífica del agua ( $C_{agua}$ ) se considera constante e igual a  $4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ . El caudal volumétrico se considera constante e igual al caudal nominal de las bombas del primario del condensador y del evaporador respectivamente (201 l/h).

$$|\dot{Q}_{bomba,agua}| = \dot{m}_{agua} \cdot C_{agua} \cdot |T_{imp} - T_{ret}| \quad (3.8)$$

Se ha realizado un filtrado previo de los datos para calcular la potencia térmica proporcionada por el condensador y el evaporador a través de la diferencia de temperaturas tan solo cuando la bomba está en funcionamiento. Se han establecido estos períodos a través del caudal de captación de agua del freático y solo se ha aplicado la ecuación 3.8 en estos casos.

A través de la visualización de los datos y manteniendo conversaciones con el servicio de mantenimiento de la UTCE y con la Oficina Verde se han podido conocer los períodos en los que la bomba ha fallado por diversos motivos o los períodos en los que se ha puesto en marcha para probar el equipo y no con el ánimo de climatizar el edificio.

### 3.2.3. Bomba de Calor Aire-Agua

Para calcular el aporte de energía térmica de la bomba de calor aire-agua se utilizan ecuaciones análogas a las descritas en el apartado anterior para la bomba de calor agua-agua (ecuación 3.8), pero aplicando los valores que se tienen para el condensador y el evaporador de esta enfriadora. El caudal de la bomba de impulsión ( $\dot{v}_{agua}$ ) en este caso es de 19,11 l/s, según las especificaciones del fabricante.

### 3.2.4. Generación solar

#### Paneles PVT

La energía térmica proporcionada por los paneles híbridos se estima conociendo el caudal del líquido caloportador y las temperaturas de impulsión y de retorno de los paneles según la ecuación 3.9.

$$\dot{Q}_{PVT} = \dot{m}_{\text{fluido}} \cdot C_{p,\text{fluido}} \cdot (T_{\text{impulsion}} - T_{\text{retorno}}) \quad (3.9)$$

Donde  $\dot{Q}_{PVT}$  es la potencia térmica suministrada por los paneles PVT,  $T_{\text{impulsion}}$  es la temperatura de salida del fluido de los paneles,  $T_{\text{retorno}}$  es la temperatura con la que el fluido entra a los paneles y donde  $\dot{m}_{\text{fluido}}$  y  $C_{p,\text{fluido}}$  son el caudal másico y la capacidad calorífica del fluido caloportador respectivamente.

Se sabe que el fluido que utiliza esta tecnología es una mezcla de agua al 30% de glicol. Para los cálculos, se ha tomado una capacidad calorífica constante e igual a  $3,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ . Para calcular el caudal másico se ha tomado el caudal volumétrico nominal de la bomba de impulsión de los paneles (6720 l/h). Se ha considerado una densidad del fluido constante e igual a  $1015 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  para calcular el flujo másico de fluido caloportador con una ecuación análoga a la ecuación 3.7.

### Depósito de Inercia

El calor almacenado en el depósito de almacenamiento térmico se calcula mediante la ecuación 3.10. Donde  $\dot{Q}_{\text{deposito}}$  es la energía almacenada por unidad de tiempo en el tanque,  $C_{p,\text{agua}}$  es la capacidad calorífica del agua, que en este caso se considera constante y donde  $T_m$  es la temperatura promedio del depósito y que se calcula como la media de los valores medidos por cada una de las sondas de temperatura.

$$Q_{\text{deposito}} = m_{\text{agua}} \cdot C_{\text{agua}} \cdot T_m \quad (3.10)$$

Es posible conocer la energía cargada o descargada en el depósito sin más que hacer la diferencia entre el calor acumulado a una determinada hora y a la siguiente.

Así, se ha podido saber si el depósito utiliza o no el calor aportado por los paneles solares térmicos. En el TFM, se ha determinado el número de horas que el depósito se carga a lo largo del año en función de la temperatura media del depósito y de la temperatura de impulsión de los paneles PVT.

## 4 | Análisis de Resultados

Se presentan en esta sección los resultados del estudio energético del nuevo edificio de la Facultad de Filosofía y Letras.

En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los equipos de climatización. Por último, se presenta el reparto del aporte energético de cada tecnología en un mes de verano de temperaturas extremas y en un mes de invierno de temperaturas extremas.

### 4.1. Pozos Canadienses

Todos los cálculos realizados con los datos de las cuatro instalaciones de pozos canadienses se han realizado bajo las siguientes premisas:

1. La puesta en marcha o no de los sistemas se ha establecido según el horario de consigna establecido por el equipo de mantenimiento de la UTCE. El funcionamiento se establece desde las 7 de la mañana hasta las 9 de la noche.
2. Se ha considerado el caudal nominal de cada una de las instalaciones al no tener esta variable monitorizada.
3. Se consideran, como meses en los que la demanda térmica es de calefacción los meses comprendidos entre enero y mayo y los meses entre octubre y diciembre. Se considera que la demanda es de refrigeración en los meses restantes.

#### 4.1.1. Funcionamiento Incorrecto

En estas condiciones, se ha obtenido la energía aportada por las cuatro instalaciones en total cada mes del año y las horas de mal funcionamiento del sistema, que son las horas en las que:

- El sistema calienta el aire del exterior en régimen de refrigeración ( $T_{\text{ext}} < T_{\text{conducto}}$ ).

- El sistema enfría el aire del exterior cuando se desea calefactar ( $T_{\text{ext}} > T_{\text{conducto}}$ ).

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.1. En la figura 4.1 se comparan las horas de refrigeración y de calefacción totales estimadas con las horas de funcionamiento incorrecto en los dos regímenes para cada una de las instalaciones.

	Energía (kWh)	Horas mal funcionamiento (h)
Enero	13.332	5
Febrero	10.958	16
Marzo	11.493	30
Abril	9.301	32
Mayo	9.881	34
Junio	9.558	399
Julio	10.257	443
Agosto	8.935	195
Septiembre	5.399	449
Octubre	7.588	465
Noviembre	8.642	0
Diciembre	8.366	108

TABLA 4.1: *Energía suministrada (kWh) por el conjunto de las cuatro instalaciones de pozos canadienses y horas de mal funcionamiento por mes del año 2024.*

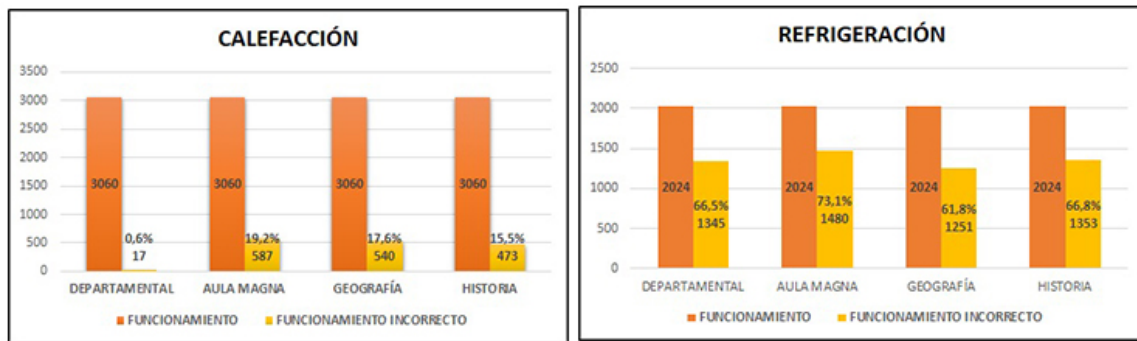


FIGURA 4.1: *Horas de funcionamiento y horas de funcionamiento incorrecto de los pozos canadienses en régimen de calefacción (izquierda) y en régimen de refrigeración (derecha).*

Está claro, a la vista de los resultados, que las horas de mal funcionamiento aumentan significativamente en los meses en los que la temperatura exterior es elevada. Cabe pensar, entonces, que en estos meses el aire exterior se introduce directamente a las UTAs sin el pretratamiento en los tubos canadienses. De hecho, la energía que aporta el sistema se reduce significativamente en los meses de verano. Septiembre es el mes en el que el conjunto de los pozos aporta menos energía, siendo un mes en el que el edificio funciona a plena ocupación y sin festivos de por medio que reduzcan las horas de climatización. Una reducción de la energía estimada, habiendo tomado el caudal de aire de impulsión constante, solo se explica por una reducción del salto térmico

conseguido entre el aire del exterior y el aire a la salida del conducto. Al haber una diferencia no suficientemente significativa entre la temperatura del terreno y la temperatura del aire exterior, el sistema no se activa. En la figura 4.2, se muestra claramente cómo las líneas que representan la temperatura exterior y la temperatura de los conductos se superponen en algunos momentos del año. El mes de julio, llega a estar la temperatura exterior por debajo de la temperatura de los conductos. Por tanto, las horas de mal funcionamiento son, en realidad, horas en las que el sistema habría funcionado mal si se hubiera activado.

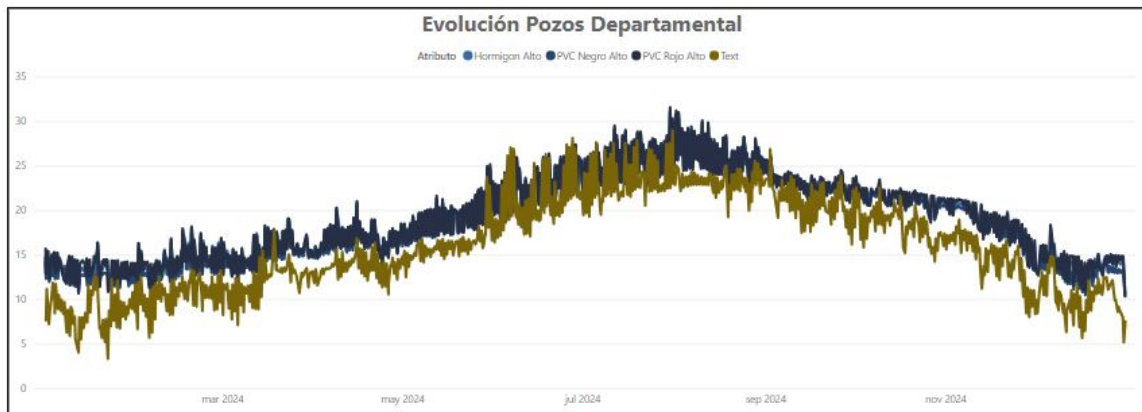


FIGURA 4.2: *Evolución de las temperaturas (°C) de interés de la instalación de pozos del EDE en el año 2024. Se representan la temperatura exterior (marrón) y las temperaturas de los tubos de PVC rojo, PVC negro y hormigón del nivel alto (azul claro, azul oscuro y morado respectivamente).*

Estos resultados permiten sacar las siguientes conclusiones tras el primer año de funcionamiento del edificio:

- Parece que las instalaciones de pozos canadienses del edificio de la Facultad de Filosofía y Letras no proporcionan apenas potencia térmica de refrigeración cuando es necesario. No ocurre lo mismo en los meses de invierno, en los que las instalaciones parecen funcionar correctamente y proporcionar la potencia térmica esperada la mayor parte del tiempo.
- Una monitorización del caudal de aire introducido en los tubos permitiría reducir la incertidumbre de los resultados aportados. Conocer el caudal permitiría calcular las variables horarias con mayor exactitud. También permitiría conocer los momentos en los que los pozos están realmente funcionando y los momentos en los que, a pesar de tener establecida la consigna horaria, el aire se introduce directamente desde el exterior a las unidades de tratamiento de aire.
- Se recomienda realizar el estudio en los años venideros pues en 2024 la recepción de datos sufrió fallos muchas horas del año, sobre todo en el mes de julio, en el que la demanda de refrigeración es elevada.

### 4.1.2. Energía Aportada

Se ha determinado la energía recuperada con las cuatro instalaciones de tubos canadienses a lo largo del año 2024. Para mayor precisión de la estimación, no se han considerado aquellas horas de funcionamiento incorrecto. En la figura 4.3 se muestra el reparto de la energía proporcionada anualmente por cada instalación de tubos canadienses.

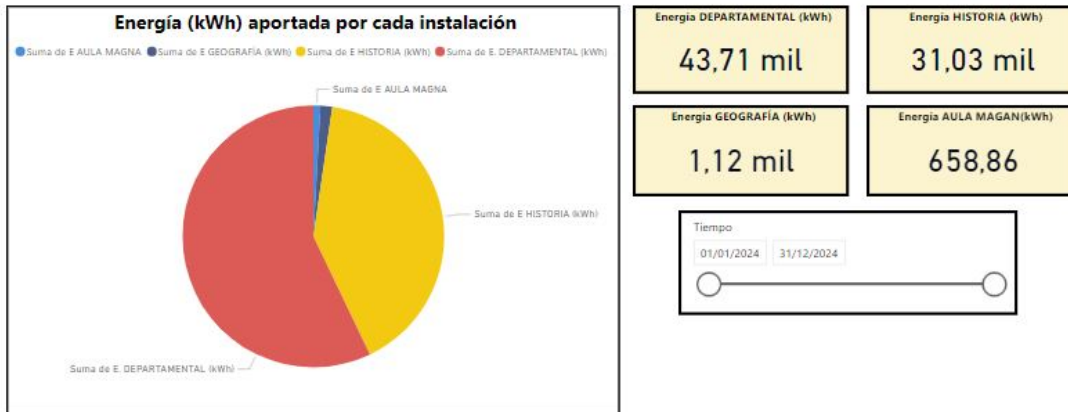


FIGURA 4.3: Energía anual proporcionada por cada instalación de pozos canadienses: instalación del EDE (rojo), instalación del Aula Magna (azul claro), instalación de Historia (amarillo) e instalación de Geografía (azul oscuro).

Las instalaciones del edificio EDE y del módulo de Historia representan el 97,68 % de la energía total aportada por las instalaciones de pozos canadienses en el año 2024. Ello se debe, principalmente, a que el área de intercambio es mucho mayor en estas dos instalaciones y al hecho de que el caudal nominal de las dos es muy superior al caudal de aire que se considera que circula por los tubos del Aula Magna y del módulo de Geografía. En la tabla 4.2 se desagrega la energía aportada en régimen de refrigeración y en régimen de calefacción en el año 2024.

	Anual (2024)	Calefacción	Refrigeración
Energía (kWh)	76.518,86	67.830,86	8.688,00

TABLA 4.2: Energía aportada por las cuatro instalaciones de pozos canadienses en todo el año, en el régimen de calefacción y en el régimen de refrigeración del año 2024.

La escasa energía térmica en régimen de refrigeración aportada responde a los siguientes factores:

- Se ha determinado un alto número de horas de funcionamiento erróneo de las instalaciones en los meses de verano que luego se han desestimado al calcular el aporte de energía. Es posible que haya horas de refrigeración en meses templados que no se han considerado al condicionar los cálculos por las consignas.

- En verano el edificio permanece cerrado desde el 1 de agosto hasta el 18 de agosto, días en los que cabría esperar demanda de refrigeración en el edificio. Además, desde julio y hasta septiembre, el edificio tiene ocupación parcial al no impartirse clase.

El estudio análogo realizado en las instalaciones de pozos canadienses del edificio LUCIA de la Universidad de Valladolid estimó una recuperación de energía de 102.014 kWh/año [41]. El estudio realizado en la Unidad de Urgencias del Hospital San Jorge de Huesca mostró que los tubos aportaban, aproximadamente, 114.500 kWh/año. En la tabla 4.3 se compara la energía recuperada en cada uno de los edificios con esta tecnología.

	Facultad de Filosofía y Letras	LUCIA	Hospital San Jorge
Número de Conductos	77	52	32
Longitud del Conducto (m)	(23,73-43,82)	16,00	54,40
Energía (kWh/año)	76.518	102.014	114.500
Energía - Calefacción (kWh)	67.830	36.094	64.480
Energía - Refrigeración (kWh)	8.688	65.920	50.020

TABLA 4.3: Comparación de las instalaciones de la Facultad de Filosofía y Letras, el edificio LUCIA y el Hospital San Jorge.

La comparación muestra grandes diferencias entre la energía recuperada en verano y en invierno en cada uno de los edificios. Sin embargo, la energía aportada por el sistema en régimen de calefacción en los edificios de Filosofía y Hospital San Jorge es similar. Ello puede deberse a que el clima de las ciudades de Zaragoza y Huesca es muy similar y a que, aunque el edificio de Filosofía y Letras incorpora un gran número de tubos frente a la instalación del hospital, la longitud de los tubos es muy inferior en el edificio de Zaragoza. La energía recuperada en régimen de refrigeración en el edificio objeto de este estudio es mucho menor que en los otros dos edificios. Será necesario estudiar el sistema en los años venideros para ver cómo se comporta el sistema ante las diferentes condiciones externas. También es interesante hacerlo con el fin de detectar posibles anomalías en los datos medidos que estén arrojando resultados incorrectos.

### 4.1.3. Los Pozos Canadienses como Laboratorio

Como se ha indicado previamente en este Trabajo, el nuevo edificio de la Facultad de Filosofía y Letras se diseñó como un edificio-laboratorio en el que poner a prueba diversas instalaciones y estrategias de gestión. Las cuatro instalaciones de pozos canadienses se diseñaron bajo esta premisa. Se pretendía probar el comportamiento de tres materiales (PVC rojo, PVC negro y hormigón) y comprobar si había diferencias en la energía transferida del terreno al aire según la altura de los pozos. En las figuras 4.4 y 4.5 muestran las diferencias que se han encontrado al analizar los conductos de los distintos materiales a la misma altura (se ha elegido el nivel alto por estar más

expuesto a las condiciones externas) y al analizar conductos de PVC rojo a distintas alturas de cada una de las instalaciones.

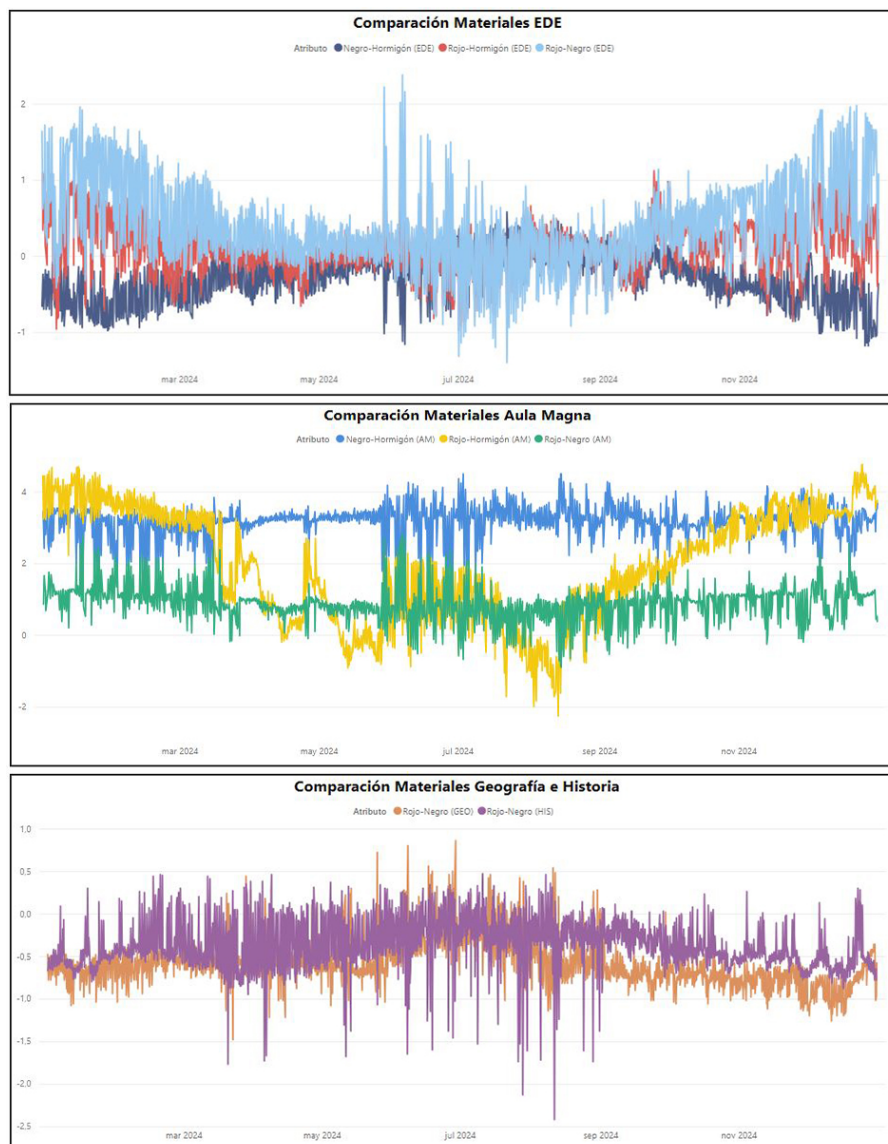


FIGURA 4.4: Comparación de la diferencia de temperatura (°C) entre los conductos del nivel alto de distintos materiales para las 4 instalaciones de pozos canadienses.

Los datos muestran que en las instalaciones de Geografía, Historia y el edificio EDE las diferencias no son significativas. En todo el año, se consiguen diferencias máximas de hasta 2°C. Teniendo en cuenta la incertidumbre de las sondas de temperatura, se puede concluir que el material del conducto no es un factor determinante en el rendimiento del sistema. En la instalación del Aula Magna se observan diferencias más significativas al comparar el PVC negro con el hormigón, alcanzando diferencias de hasta 4°C, sin embargo, al comparar otros materiales, el comportamiento es similar al que se observa en otras instalaciones.

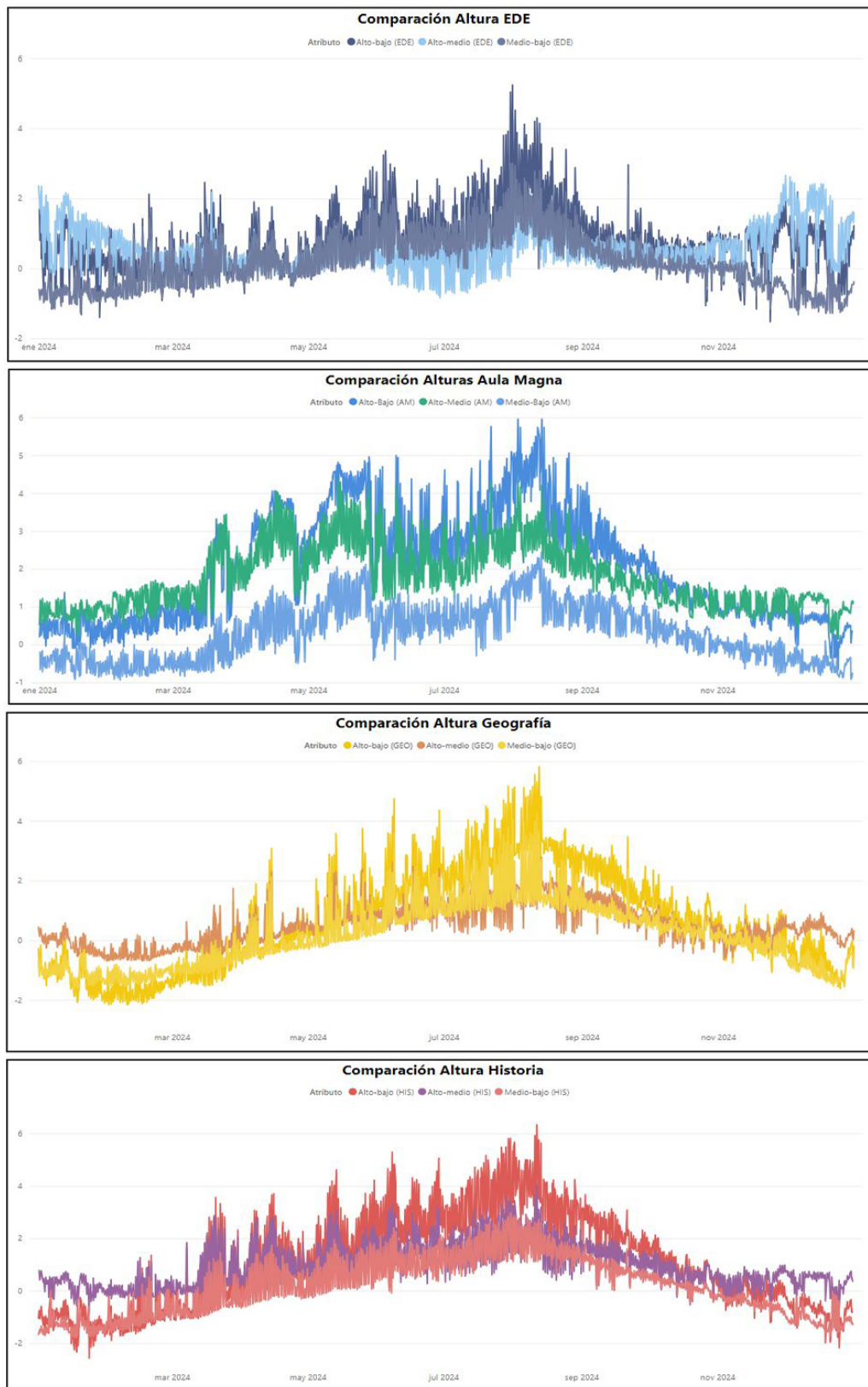


FIGURA 4.5: Comparación de la diferencia de temperatura (°C) entre los conductos a distintas alturas para las 4 instalaciones de pozos canadienses. Se ha estudiado el material PVC rojo.

Si se comparan las temperaturas de los conductos a distintas alturas de una misma instalación, se encuentra que la mayor diferencia se da entre el conducto del nivel alto y del bajo en las cuatro instalaciones. En este caso la diferencia es más significativa que en el estudio de la diferencia de comportamiento entre materiales y puede deberse a la exposición del nivel superior a la variación de las condiciones meteorológicas.

#### 4.1.4. Condensación en los Conductos

Se ha estudiado la condensación producida en uno de los conductos de la instalación de pozos del edificio EDE. El tubo es uno de los de PVC rojo de la instalación del edificio EDE. En la tabla 4.4 se presentan los resultados obtenidos: las horas en las que se ha detectado que ocurre condensación, el porcentaje de horas que supone del total del funcionamiento en régimen de refrigeración y de calefacción y la energía aportada por el sistema por variación de temperatura (calor sensible) y por cambio de fase (calor latente). Se da, en la última fila de la tabla, la relación entre la energía sensible y la energía latente.

	Refrigeración	Calefacción	Total
Horas Condensación	157	2.251	2.408
Horas funcionamiento	2.024	3.060	4.181
% de horas que condensa	7,76	73,56	47,36
$Q_{\text{latente}}$ (kWh/año)	0,44	1,35	1,79
$Q_{\text{sensible}}$ (kWh/año)	338,12	3.985,71	4.323,83
$Q_{\text{sensible}}/Q_{\text{latente}}$	768,45	2.952,40	2.415,00

TABLA 4.4: Variables de interés en el estudio de la condensación en el conducto de PVC rojo del nivel alto de la instalación de pozos del EDE.

Como se apuntaba en el Trabajo [42], el aporte de energía latente es despreciable frente a la energía que aporta el sistema debido al salto de temperatura. El calor sensible es 768,45 veces superior al latente en los meses de verano, y 2.952,4 veces superior en los meses de invierno.

Para sacar conclusiones más precisas, sería interesante disponer de los datos de humedad en distintos conductos y distintas instalaciones, aunque a la luz de los resultados preliminares, parece verificarse el hecho de que el calor latente es despreciable frente al sensible y, además, la modelización precisa es mucho más compleja.

A pesar de ello, resulta importante conocer las horas en las que se produce condensación, puesto que puede generar problemas de salubridad en las instalaciones y deben tomarse las debidas medidas para evitarlo.

## 4.2. Bomba de Calor Agua-Agua

Todos los cálculos realizados para la bomba de calor agua-agua se han desarrollado bajo las siguientes condiciones:

1. La puesta en marcha o no del sistema se establece en función de la monitorización del caudal de agua captado del freático.
2. Se han calculado los aportes de energía del condensador y del evaporador de la bomba teniendo en cuenta los valores de caudal nominal de las bombas de impulsión (bombas BPC y BPF1 en la figura 2.3).

### 4.2.1. Energía Aportada por la Bomba de Calor Agua-Agua

En la figura 4.6 se representa el calor captado del freático a lo largo del año 2024.

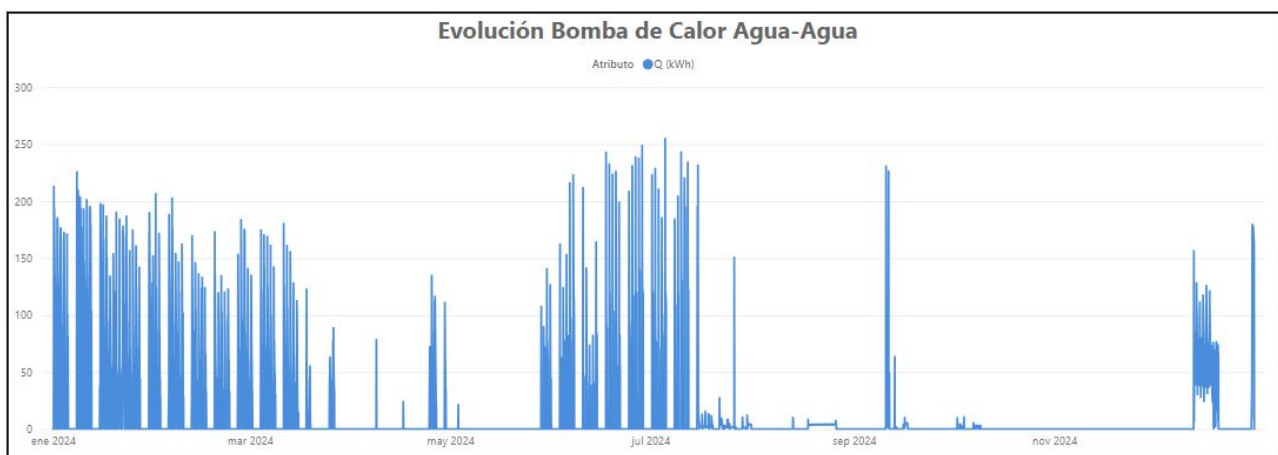


FIGURA 4.6: Energía aportada por el freático en el año 2024.

Esta representación permite conocer los momentos en los que se ha precisado climatización en el edificio, ya sea para calefactar o para refrigerar los espacios, pues la bomba de calor agua-agua es el equipo de aporte térmico principal del edificio. Se identifica claramente la necesidad de climatización en los primeros meses del año y en los meses centrales del verano. Es evidente, por la representación, que la demanda de refrigeración en los meses cálidos del año supera a la demanda de calefacción de los meses fríos. El día 15 de julio la bomba de calor agua-agua dejó de funcionar correctamente hasta mediados de diciembre debido a fallos en el sistema. Los picos que se observan en septiembre responden a pruebas realizadas por el equipo de mantenimiento para examinar el problema y no a un aporte de energía demandada por el edificio. En todo el año, el freático ha aportado unos 376.030 kWh en 1.280 horas de funcionamiento correcto del equipo. En la tabla 4.5 se desagregan la energía aportada en régimen de calefacción y en régimen de

refrigeración para la bomba de calor agua-agua del edificio de la Facultad de Filosofía y Letras. También se presentan las horas de funcionamiento, el volumen captado,  $V_{\text{captado}}$  y la relación  $Q_{\text{pozo}}/V_{\text{captado}}$  en los dos modos de funcionamiento.

	$Q_{\text{pozo}}$ (kWh)	Horas Funcionamiento (h)	$V_{\text{captado}}$ (m <sup>3</sup> )	$Q_{\text{pozo}}/V_{\text{captado}}$ (kWh/m <sup>3</sup> )
Refrigeración	81.610	248	11.675	6,99
Calefacción	294.420	1.003	64.300	4,58
Total (año 2024)	376.030	1.251	75.975	4,95

TABLA 4.5: *Energía aportada por la bomba, horas de funcionamiento, volumen de agua captado del freático y relación  $Q_{\text{pozo}}/V$  en régimen de refrigeración y de calefacción de la bomba de calor agua-agua*

Está claro que las horas de funcionamiento en verano son inferiores a las horas de uso en invierno porque es el período de tiempo en el que se detectaron fallos en el sistema. Ello hace que la energía aportada en los dos regímenes y el volumen captado difieran tanto. La relación  $Q_{\text{pozo}}/V_{\text{captado}}$  de refrigeración supera en 2,41 unidades a la relación  $Q_{\text{pozo}}/V_{\text{captado}}$  de calefacción en el año 2024, lo que implica una mayor energía aportada al edificio con una captación menor de agua del freático. Ello puede deberse a que el agua captada del freático se mantiene a temperaturas en torno a los 19°C a lo largo de todo el año (véase figura 4.7) y esto beneficia al rendimiento de la bomba en régimen de refrigeración.

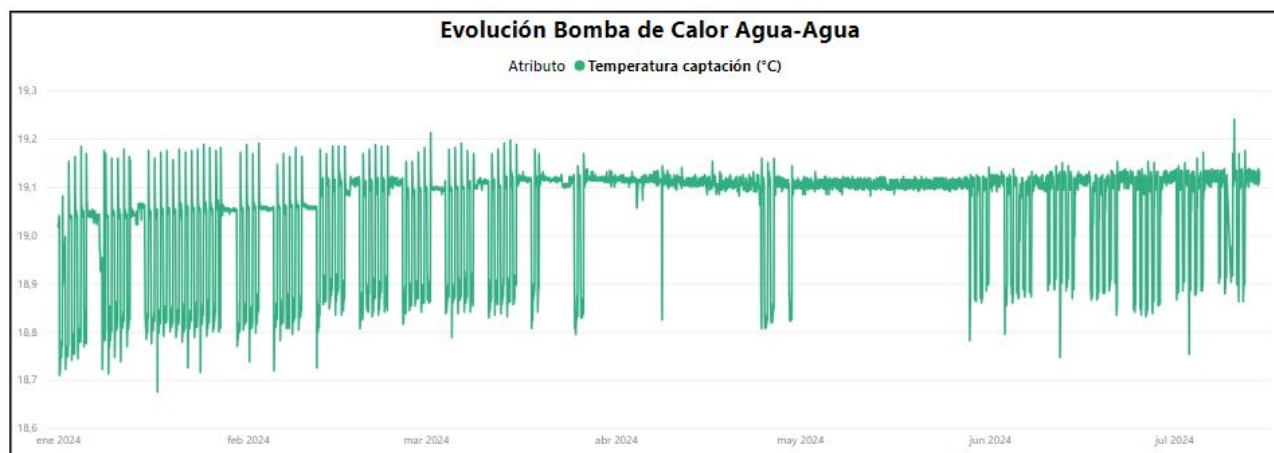


FIGURA 4.7: *Temperatura de captación de la bomba de calor agua-agua entre enero y julio de 2024.*

Se comparan estos valores con los que se tienen para las otras seis instalaciones de bomba de calor agua-agua de la Universidad de Zaragoza. Los resultados se muestran en la tabla 4.6. La relación  $Q_{\text{pozo}}/V_{\text{captado}}$ , que se puede interpretar como una medida de la eficiencia, de la instalación del edificio de Filosofía y Letras es la mayor de la Universidad en el año 2024. En este sentido, sería interesante poder estudiar ampliamente las variables que afectan a esta medida como el uso

en modo refrigeración o calefacción en cada instalación o la temperatura del agua del freático en el punto de captación de cada pozo, por ejemplo, para poder establecer conclusiones precisas.

	Filosofía	Lorenzo Normante	I+D	Ada Byron	Betancourt	Paraninfo	María Moliner
$Q_{\text{pozo}}$ (kWh)	376.030	227.501	291.996	263.932	665.894	485.115	96.413
Horas Uso	1.251	1.362	973	910	1.768	2.969	1.080
$V_{\text{captado}}$ (m <sup>3</sup> )	75.975	56.316	79.360	74.059	263.856	465.702	35.030
$Q_{\text{pozo}}/V_{\text{captado}}$	4,95	4,04	3,68	3,56	2,52	1,04	2,75

TABLA 4.6: Comparación de la energía aportada por el freático, de las horas de funcionamiento y del volumen de agua captado, de las siete instalaciones de bomba de calor agua-agua de la Universidad de Zaragoza en el año 2024.

### 4.2.2. Limitaciones del Estudio

En la figura 4.8 se representan el aporte de energía del pozo, del condensador y del evaporador en una semana de invierno y en una semana de verano.

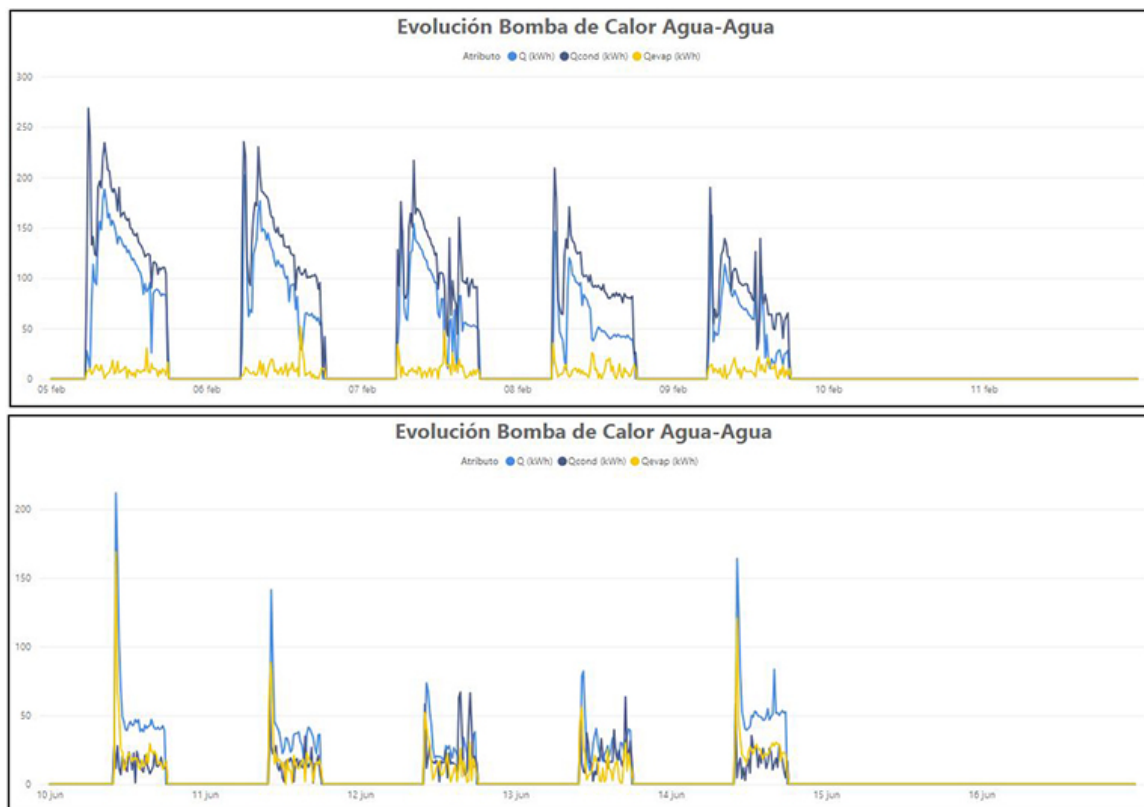


FIGURA 4.8: Energía (kWh) aportada por el pozo (azul oscuro) y por el condensador (azul claro) y el evaporador (amarillo) de la bomba agua-agua una semana de invierno (arriba) y una semana de verano (abajo).

La diferencia entre la energía proporcionada por el agua del freático y la energía térmica que proporciona finalmente el condensador se debe a las pérdidas térmicas inherentes al intercam-

biador de calor (INT. COND. en la figura 2.3). Se ha calculado el calor del condensador tomando el caudal nominal de la bomba de impulsión (BPC en la figura 2.3) en lugar del caudal real, de modo que los resultados pueden estar ligeramente sobreestimados. El mismo razonamiento se puede aplicar al funcionamiento del evaporador para el aporte de refrigeración. Es por eso que en el estudio se considera la energía aportada por el pozo y no la que se determina en los intercambiadores de calor (condensador y evaporador), puesto que los datos permiten determinar la energía con menor incertidumbre.

### 4.3. Generación solar

#### 4.3.1. Energía Aportada por el Sistema de Generación Solar

Se ha determinado el calor proporcionado por los paneles PVT y la energía cargada y descargada del depósito para el sistema de generación solar. Los resultados se muestran en la tabla 4.7.

	$Q_{\text{PVT}}$ (kWh/año)	$Q_{\text{cargado}}$ (kWh/año)	$Q_{\text{descargado}}$ (kWh/año)	$T_{\text{media}}$ (°C)	Número de meses
Verano	39.790	10.270	7.830	58,04	4
Invierno	28.060	23.010	17.530	33,6	8

TABLA 4.7: Variables de interés del sistema de generación solar en verano y en invierno.

Como cabría esperar, los meses de verano la energía térmica aportada por los paneles PVT es muy superior a la que generan en los meses de invierno, aún considerando la mitad de meses, debido a la elevada exposición a la radiación solar estos meses. Sin embargo, la energía cargada y descargada del depósito se reduce en los meses más cálidos del año. Ello puede deberse a la relación de temperaturas del depósito y de los paneles solares. Mientras que la temperatura media del depósito en los meses de invierno es de 33,6 °C, en verano es de 58,04 °C. Comparando las temperaturas de impulsión de los PVT y la temperatura del depósito (véase figura 4.9) se ve que, mientras que en los meses de invierno la temperatura del depósito se sitúa siempre por debajo de la temperatura de impulsión de los paneles (salvo cortos períodos de tiempo), en los meses de verano se observa un largo período de tiempo (a partir de septiembre) en el que la temperatura media del depósito está muy por encima de la temperatura de trabajo de los colectores térmicos. En esta situación, el flujo de los PVT enfriaría el depósito, así que no se carga. Hay que tener en cuenta, también, que para que el depósito cargue, la diferencia de temperatura entre la impulsión de los paneles y el depósito debe ser suficientemente grande como para vencer las pérdidas que se dan en los intercambiadores y las bombas de impulsión, así que hay períodos en los que la condición de temperatura se cumple estrictamente pero aún así el depósito no se carga.

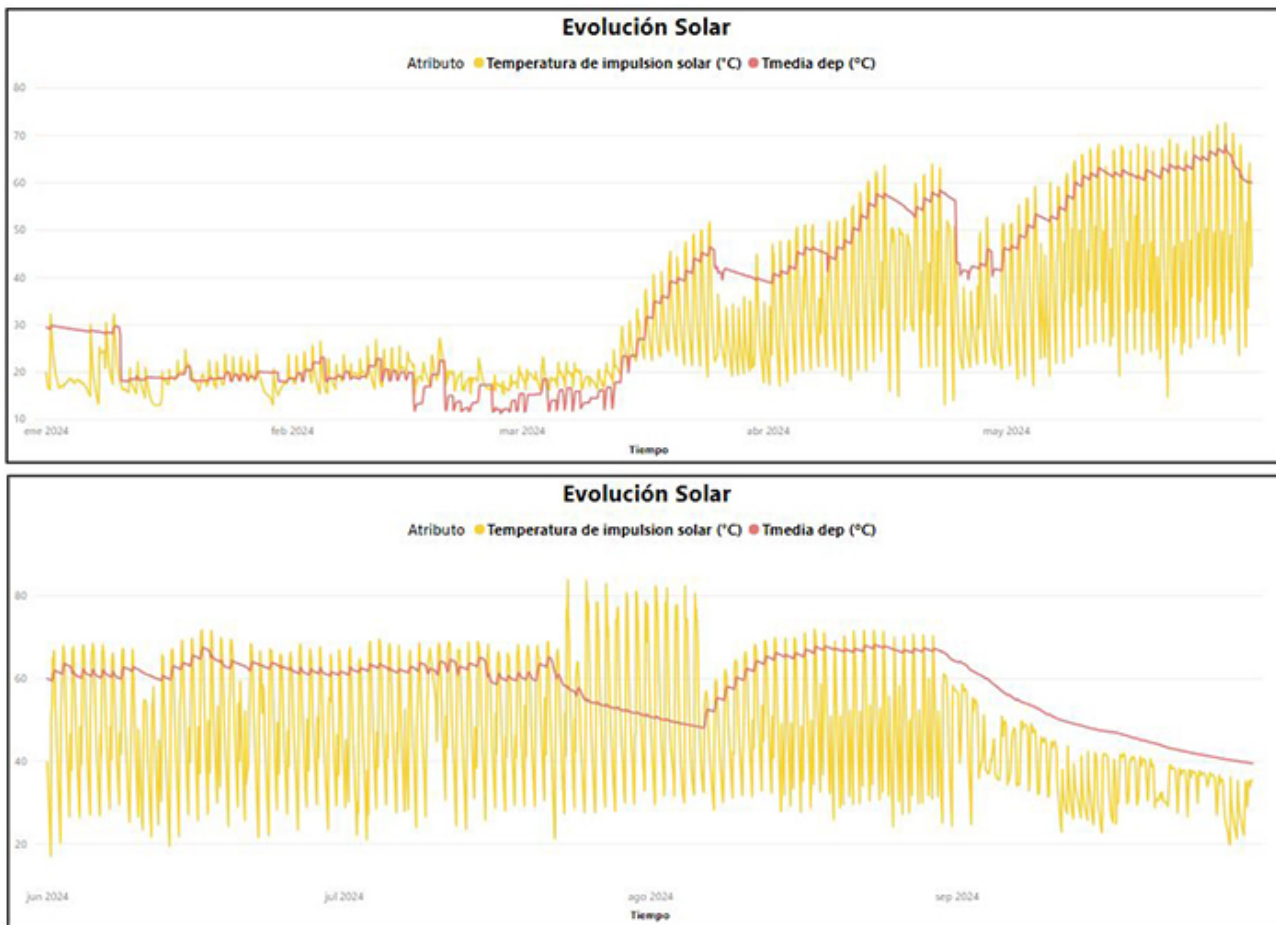


FIGURA 4.9: *Temperaturas de impulsión y retorno de los paneles PVT en los meses de enero a mayo (arriba) y en los meses de junio a septiembre (abajo).*

### 4.3.2. Estudio de la Estratificación Térmica

En la figura 4.10 se muestra la diferencia entre la temperatura que miden las tres sondas de temperatura del depósito de inercia, localizadas a diferentes alturas del tanque. Analizando el total del año 2024, se ve que la diferencia no suele superar el grado de temperatura, sobre todo en los primeros meses del año hasta septiembre. Esto muestra que no se produce apenas estratificación térmica en el tanque, algo que es de esperar ya que el depósito tiene poca capacidad y está situado en horizontal. A final del año y en el mes de julio los datos parecen menos uniformes, lo que sugiere fallos en el sistema de monitorización o en el sistema de recepción de datos.

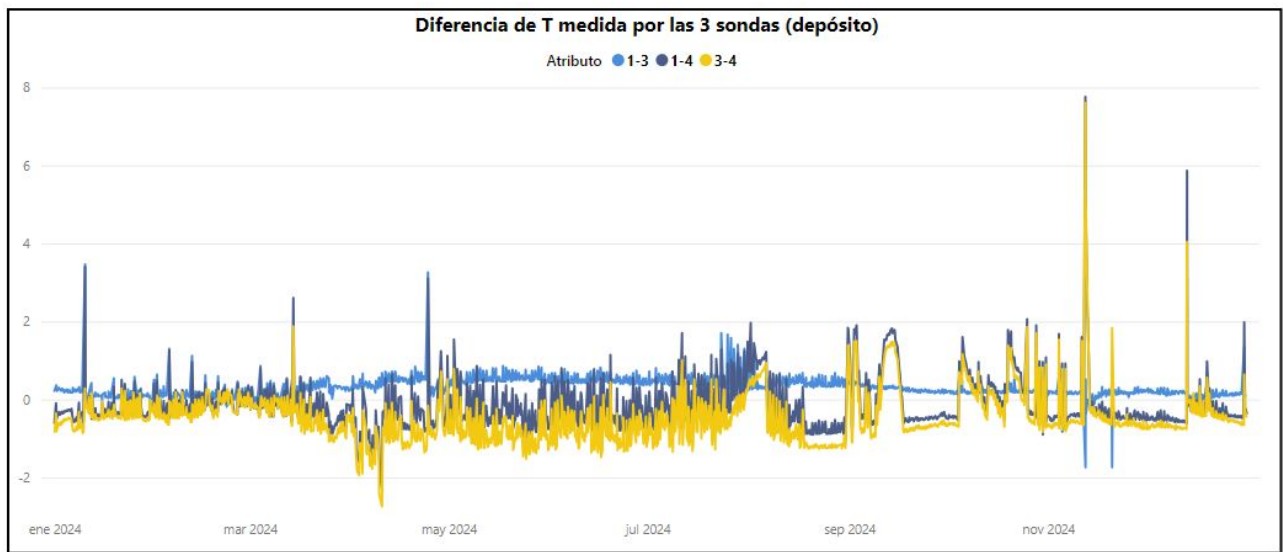


FIGURA 4.10: Evolución de la diferencia de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) captada por cada una de las sondas del depósito de inercia.

#### 4.4. Bomba de Calor Aire-Agua

La bomba de calor aire-agua es un sistema que solo se activa cuando la demanda de climatización es pequeña y no es necesario activar la bomba de calor agua-agua, o bien cuando la bomba hidrotérmica falla.

La bomba aerotérmica está pensada para modular, y tiene una potencia que cubre, aproximadamente, un cuarto de la demanda térmica del edificio. Sin embargo, este año se ha utilizado como equipo principal de climatización en el período de tiempo en el que no se ha podido hacer uso de la bomba de calor agua-agua. En el período comprendido entre el 15 de julio de 2024 y el 31 de diciembre de 2024, la bomba de calor aerotérmica ha aportado la energía presentada en la tabla 4.8.

	$Q_{\text{ref}}$ (kWh/año)	$Q_{\text{cal}}$ (kWh/año)
Bomba de calor aire-agua	169.620	145.020

TABLA 4.8: Energía aportada por la bomba de calor aire-agua en régimen de refrigeración y de calefacción.

La energía aportada en régimen de refrigeración es muy superior a la que ha aportado la bomba hidrotérmica en el año 2024. Esto se debe únicamente al fallo de la bomba hidrotérmica a mediados del mes de julio. La demanda de refrigeración se ha cubierto, en los meses de agosto y septiembre, completamente con la bomba de calor aerotérmica. Además, ya se ha mostrado que en los meses estivales, los sistemas de pozos canadienses tampoco contribuyen en gran medida a climatizar el edificio.

## 4.5. Energía Consumida

La distribuidora facilita la curva horaria de energía consumida por el edificio. Es interesante comparar el *stand-by* del edificio en distintas situaciones. El *stand-by* aquí se refiere a la energía eléctrica consumida por los equipos de emergencia y otros equipos que permanecen en estado de espera en los momentos en los que el estado operacional del edificio es reducido.

En total, en todo el año 2024, el edificio de la Facultad de Filosofía y Letras ha importado 896.000 kWh de energía eléctrica de la red. El consumo del edificio, que es superior, se cubre también con el aporte de las placas PV y de los paneles PVT. En la figura 4.11 se muestra la evolución del consumo de electricidad de la red a lo largo del año 2024.

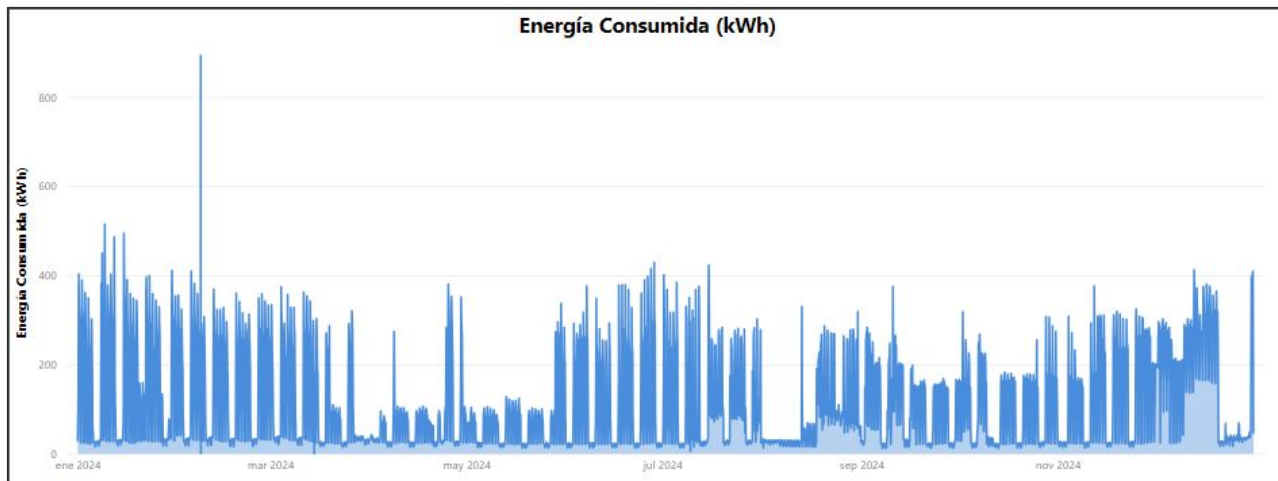


FIGURA 4.11: Energía consumida en el edificio de la Facultad de Filosofía y Letras en el año 2024.

Se localizan algunos períodos de menor consumo, que coinciden con los meses templados del año (mayo y parte de junio) y, sobre todo, con el cierre energético de agosto y con el período de vacaciones de abril y diciembre, en los que el consumo del edificio es el consumo en *stand-by*.

Los principales picos de consumo coinciden con el encendido de los equipos de climatización. La figura 4.12 muestra la comparación entre la energía importada de la red y los períodos de funcionamiento de la bomba de calor agua-agua. Los picos, que toman valores más pequeños, en el mes de mayo, se corresponden con períodos de uso del edificio en los que no ha sido necesario utilizar las bombas de calor.

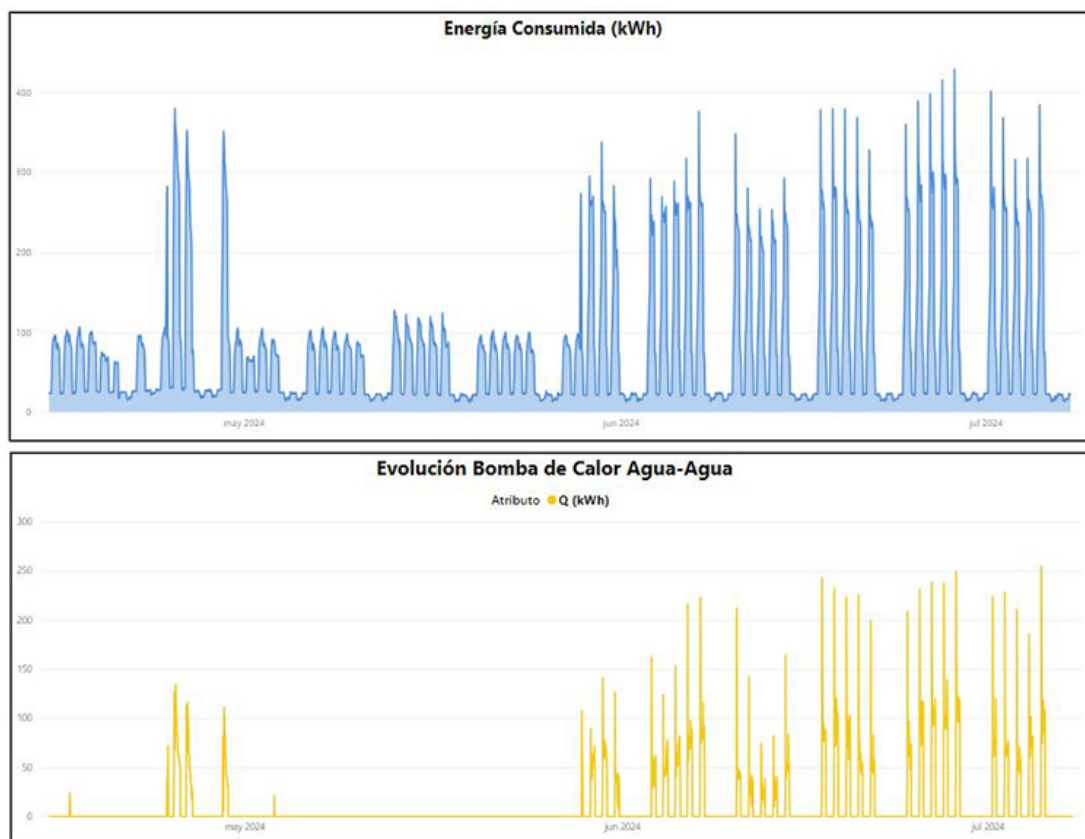


FIGURA 4.12: Energía importada de la red (arriba) y energía aportada por la bomba de calor agua-agua (abajo) en el período comprendido entre mayo y julio del año 2024.

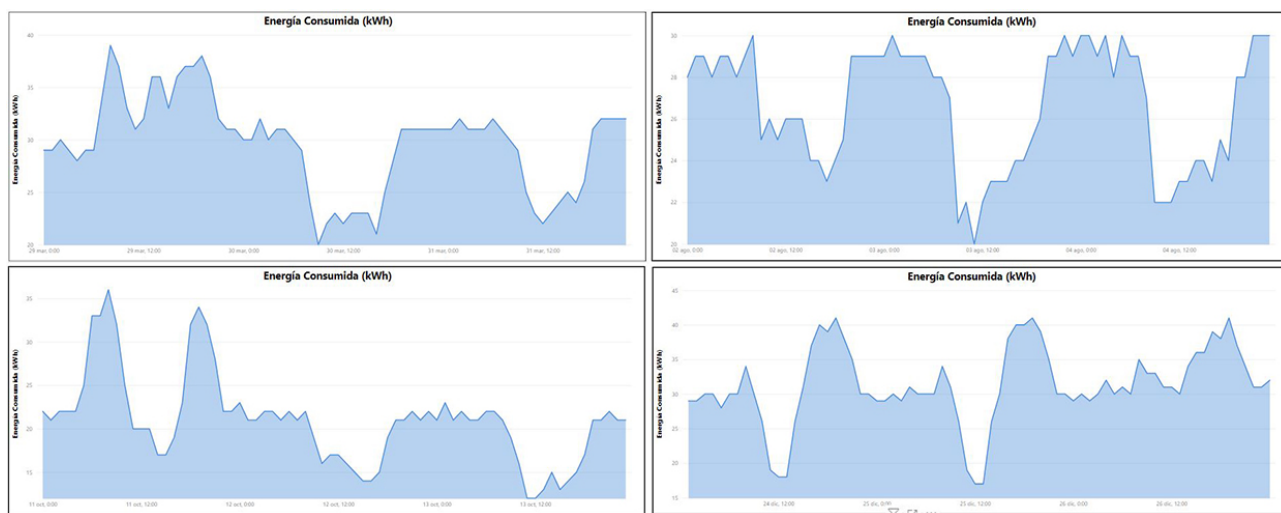


FIGURA 4.13: Energía consumida un fin de semana de marzo (arriba, izquierda), un fin de semana del cierre energético de agosto (arriba, derecha), un fin de semana de octubre (abajo, izquierda) y un fin de semana en diciembre (abajo, derecha).

La figura 4.13 muestra el consumo de energía de la red en cuatro fines de semana de marzo, agosto, octubre y diciembre. El fin de semana con mayor consumo se da en diciembre, mientras que el fin de semana de agosto, que coincide con el cierre energético de la Universidad, es aquel de menos consumo.

La diferencia de consumo entre unos y otros escenarios se debe principalmente a los hábitos de los usuarios del edificio. Un consumo elevado un fin de semana frente a días festivos o de vacaciones puede deberse a los equipos eléctricos que se dejan encendidos con el fin de trabajar en modalidad telemática. Las condiciones externas también juegan un papel fundamental, pues los valles que se muestran en cada uno de los cuatro escenarios se deben al efecto de la producción de electricidad in-situ con las instalaciones de placas solares. Una alta radiación y temperaturas templadas pueden hacer que se disminuya en gran medida la necesidad de importar energía de la red eléctrica.

Se puede concluir, tras el estudio de los primeros dieciocho días de agosto de 2024 (días de cierre energético en la Universidad), que el stand-by del edificio de la Facultad de Filosofía y Letras toma un valor en torno a los 30 kWh. Es importante apuntar que este valor es difícilmente reducible en los edificios nuevos como este, pues es necesario que algunos equipos eléctricos y electrónicos (alarmas, dispositivos del sistema de monitorización, equipos de protección de incendios y otros) funcionen constantemente para lograr un correcto funcionamiento del edificio.

## 4.6. Aporte de Energía en Invierno y en Verano

La modelización y el tratamiento de datos de las instalaciones de generación de energía permite conocer el porcentaje que aporta cada tecnología a la demanda térmica total del edificio. El reparto se muestra en la 4.14 para un mes de invierno y para un mes de verano.

En invierno, el 51,22% de la demanda la cubre la bomba de calor agua-agua, como cabría esperar, pues es el equipo de mayor potencia instalado. El otro 48,78% lo cubren la bomba de calor aire-agua, las dos grandes instalaciones de pozos canadienses y los paneles PVT.

Sin embargo, en verano, el 60,21% de la demanda en el año 2024 se cubrió con la bomba aerotérmica, al detectar fallos en la operación de la bomba de calor agua-agua. Este mes también aumenta significativamente el aporte de energía de los paneles PVT, como cabría esperar en los meses de mayor radiación solar. El resto de la demanda se cubre con los pozos canadienses y con la bomba de calor agua-agua en los días de principio de verano en los que aún estaba operacional.

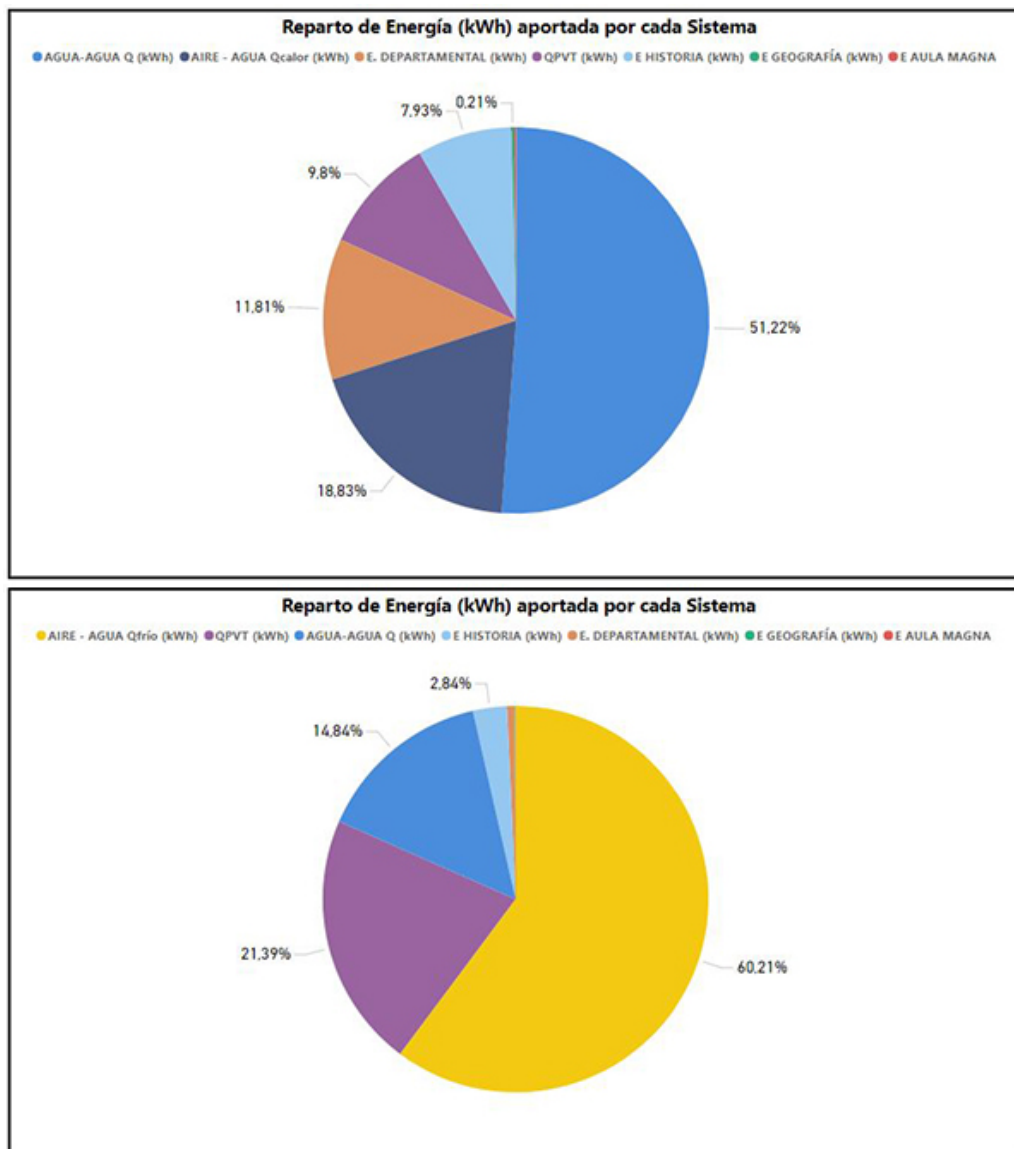


FIGURA 4.14: Porcentaje de energía aportada por cada sistema de climatización un mes de invierno (arriba) y un mes de verano (abajo).

## 5 | Conclusiones

En el presente Trabajo de Fin de Máster se ha realizado el estudio energético del nuevo edificio de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Zaragoza a través de los datos que ofrece el sistema de monitorización. Se han descrito el edificio y los sistemas primario y secundario de climatización. Se han descrito las principales instalaciones de generación de energía térmica, su modelización matemática y los resultados extraídos de su estudio. Con todo esto, se ha podido concluir lo siguiente:

- El edificio cumple los propósitos con los que fue diseñado desde el punto de vista energético. Sirve como laboratorio en el que poner a prueba distintas estrategias de eficiencia energética e instalaciones de generación de energía renovable.
- Los pozos canadienses parecen funcionar de manera óptima en invierno, mientras que en los meses cálidos, el salto de temperatura entre el exterior y el conducto es demasiado pequeño y no se utilizan para climatizar el edificio.
- El principal equipo de climatización es la bomba de calor agua-agua. Cuando ésta falla, para conseguir cubrir las demandas, la bomba aerotérmica debe funcionar 24 horas durante los 7 días de la semana, sin poder aplicar los horarios de climatización que se aplican en el resto de edificios universitarios.
- Gran parte del calor producido por los paneles PVT en verano no se utiliza para calentar el depósito de inercia. La instalación de generación solar se optimizaría si la capacidad del tanque de almacenamiento fuera mayor. Convendrá estudiar el sistema cuando se ponga en marcha la máquina de adsorción.
- Conviene estudiar los datos que ofrecen los analizadores de red con el fin de conocer los rendimientos energéticos de los equipos y el efecto de la fotovoltaica en cuanto a la importación de energía eléctrica de la red. Este análisis no se ha desarrollado en el presente

Trabajo porque la recepción de estos datos ha fallado en el primer año de funcionamiento del edificio.

- El edificio cuenta con un sistema de sondas que permite conocer datos muy valiosos para su estudio energético. Sin embargo, para aumentar la precisión de los resultados que se han obtenido en este Trabajo, convendría monitorizar otras variables de interés. Una de las variables que resulta más importante para realizar un estudio exhaustivo del comportamiento energético del edificio es el caudal de aire o agua que circula por cada una de las instalaciones. Monitorizar el caudal no sólo permitiría realizar cálculos más precisos numéricamente hablando, sino que permitiría conocer las horas de funcionamiento de cada equipo con exactitud, sin tener que recurrir a las consignas que en ocasiones pueden no respetarse.
- El estudio desarrollado en este Trabajo habría aportado resultados más precisos con la monitorización de los caudales, sin embargo, sirve como primera estimación de la energía que aporta cada sistema y sobre todo, permite conocer el comportamiento de los sistemas en el primer año de funcionamiento: los fallos detectados, las variables que afectan al funcionamiento de cada sistema, etc.
- Para seguir avanzando en el estudio de la eficiencia energética en los edificios de la Universidad, conviene seguir estudiando el comportamiento del edificio en los años venideros, probando distintas estrategias de gestión y comprobando cómo afecta la variación de las condiciones externas (se esperan veranos e inviernos más cálidos). Conviene estudiar otras tecnologías y estrategias de eficiencia energética presentes en el edificio, como la fachada de doble piel, con el fin de desarrollar un estudio integral del edificio.

# Bibliografía

- [1] Daniel Muntean, Adriana Tokar, and Dănuț Tokar. Energy efficiency of educational buildings using photovoltaic panels and air-water heat pumps. case study. *Revista Romana de Inginerie Civila*, 14(3):1–6, 2023.
- [2] Unión Europea. Directiva 93/76/CEE del Consejo, de 13 de septiembre de 1993, para limitar las emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de la eficiencia energética (SAVE). DOCE L 237, 22.9.1993, p. 28-30, 09 1993. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:31993L0076>.
- [3] Unión Europea. Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2002, sobre el rendimiento energético de los edificios. DOUE L 1, 4.1.2003, p. 65-71, 12 2002. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32002L0091>.
- [4] España. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. BOE núm. 73, de 27 de marzo de 2006, p. 12372-12427, 03 2006. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2006-5932>.
- [5] España. Real Decreto 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba la normativa básica de control metrológico de los instrumentos de medida. BOE núm. 25, de 30 de enero de 2007, p. 2840-2857, 01 2007. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-2026>.
- [6] Unión Europea. Directiva (UE) 2023/1791 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de septiembre de 2023, sobre eficiencia energética y por la que se modifica el Reglamento (UE) 2023/955 (refundición). DOUE L 231, 20.9.2023, p. 1-111, 09 2023. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj/eng>.

- [7] Unión Europea. Directiva (UE) 2024/1275 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de abril de 2024, sobre la eficiencia energética de los edificios (refundición). DOUE L 231, 20.9.2024, p. 1-111, 04 2024. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275>.
- [8] España. Real Decreto 390/2021, de 1 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de la Edificación. BOE núm. 131, de 2 de junio de 2021, p. 56149-56172, 06 2021. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-8401>.
- [9] España. Real Decreto 450/2022, de 14 de junio, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación. BOE núm. 142, de 15 de junio de 2022, p. 81973-81989, 06 2022. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2022-9848>.
- [10] Unión Europea. Directiva 2006/32/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de abril de 2006, sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos y por la que se deroga la Directiva 93/76/CEE del Consejo. DOUE L 114, 27.4.2006, p. 64-85, 04 2006. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32006L0032>.
- [11] Unión Europea. 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. DOUE L 140, 5.6.2009, p. 16-62, 04 2009. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32009L0028>.
- [12] Unión Europea. Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios. DOUE L 153, 18.6.2010, p. 13-35, 05 2010. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32010L0031>.
- [13] Unión Europea. Directiva 2010/30/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, sobre el etiquetado energético de los productos relacionados con la energía. DOUE L 153, 18.6.2010, p. 1-12, 05 2010. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32010L0030>.
- [14] Unión Europea. Directiva 2012/27/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE y por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE. DOUE L 315, 14.11.2012, p. 1-56, 10 2012. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32012L0027>.

- [15] Unión Europea. Directiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifican la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética. DOUE L 156, 19.6.2018, p. 75-91, 05 2018. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32018L0844>.
- [16] Unión Europea. Directiva (UE) 2018/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de diciembre de 2018, por la que se modifica la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética. DOUE L 328, 21.12.2018, p. 210-230, 12 2018. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32018L2002>.
- [17] España. Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación. BOE núm. 266, de 6 de noviembre de 1999, p. 35004-35023, 11 1999. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1999-21301>.
- [18] Unión Europea. Directiva 2006/32/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de abril de 2006, relativa a la eficiencia energética en el uso final de la energía y los servicios energéticos. DOUE L 114, 27.4.2006, p. 64-85, 04 2006. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX>
- [19] España. Real Decreto 1826/2009, de 27 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley de Calidad de la Edificación. BOE núm. 285, de 28 de noviembre de 2009, p. 99144-99162, 11 2009. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2009-18988>.
- [20] International Organization for Standardization (ISO). ISO 50001:2011 - Sistemas de gestión de la energía - Requisitos con orientación para su uso. ISO, Ginebra, Suiza, 06 2011. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/51297.html>.
- [21] Unión Europea. Directiva 2012/27/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética y por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE. DOUE L 315, 14.11.2012, p. 1-56, 10 2012. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX>
- [22] España. Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios. BOE núm. 94, de 20 de abril de 2013, p. 29313-29322, 04 2013. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2013-3970>.
- [23] España. Orden FOM 1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se regula el procedimiento para la certificación de la eficiencia energética de los edificios. BOE

- núm. 221, de 11 de septiembre de 2013, p. 74962-74980, 09 2013. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2013-9693>.
- [24] España. Real Decreto 238/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento para la certificación de la eficiencia energética de los edificios. BOE núm. 94, de 20 de abril de 2013, p. 29313-29322, 04 2013. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2013-3970>.
- [25] España. Real Decreto 564/2017, de 2 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley del Sector Eléctrico. BOE núm. 132, de 3 de junio de 2017, p. 47149-47262, 06 2017. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2017-6666>.
- [26] España. Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). BOE núm. 310, de 21 de diciembre de 2019, p. 107215-107258, 12 2019. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2019-17168>.
- [27] Claudio Javier García Ballano, Carlos Monné Bailo, Manuel Sánchez Iturbe, Eduardo García Aparicio, et al. Ciem. primer edificio de consumo casi nulo de titularidad municipal en zaragoza. estrategia de ejecución y funcionamiento. 2018.
- [28] JM Rey Hernández, SL González González, JF San José Alonso, A Tejero González, E Velasco Gómez, and FJ Rey Martínez. Design and characterization of a geothermal earth-air heat exchanger (eahx), applied to nzeb building. IX Congreso Ibérico | VII Congreso Iberoamericano de las Ciencias y Técnicas . . . , 2018.
- [29] Clara Good, Inger Andresen, and Anne Grete Hestnes. Solar energy for net zero energy buildings – a comparison between solar thermal, pv and photovoltaic–thermal (pv/t) systems. *Solar energy*, 122:986–996, 2015.
- [30] Mark Dannemand, Bengt Perers, and Simon Furbo. Performance of a demonstration solar pvt assisted heat pump system with cold buffer storage and domestic hot water storage tanks. *Energy and Buildings*, 188-189:46–57, 2019.
- [31] Xingxing Zhang, Xudong Zhao, Stefan Smith, Jihuan Xu, and Xiaotong Yu. Review of rd progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (pv/t) technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1):599–617, 2012.
- [32] A. Del Amo, A. Martínez-Gracia, T. Pintanel, A.A. Bayod-Rújula, and S. Torné. Analysis and optimization of a heat pump system coupled to an installation of pvt panels and a seasonal storage tank on an educational building. *Energy and Buildings*, 226:110373, 2020.

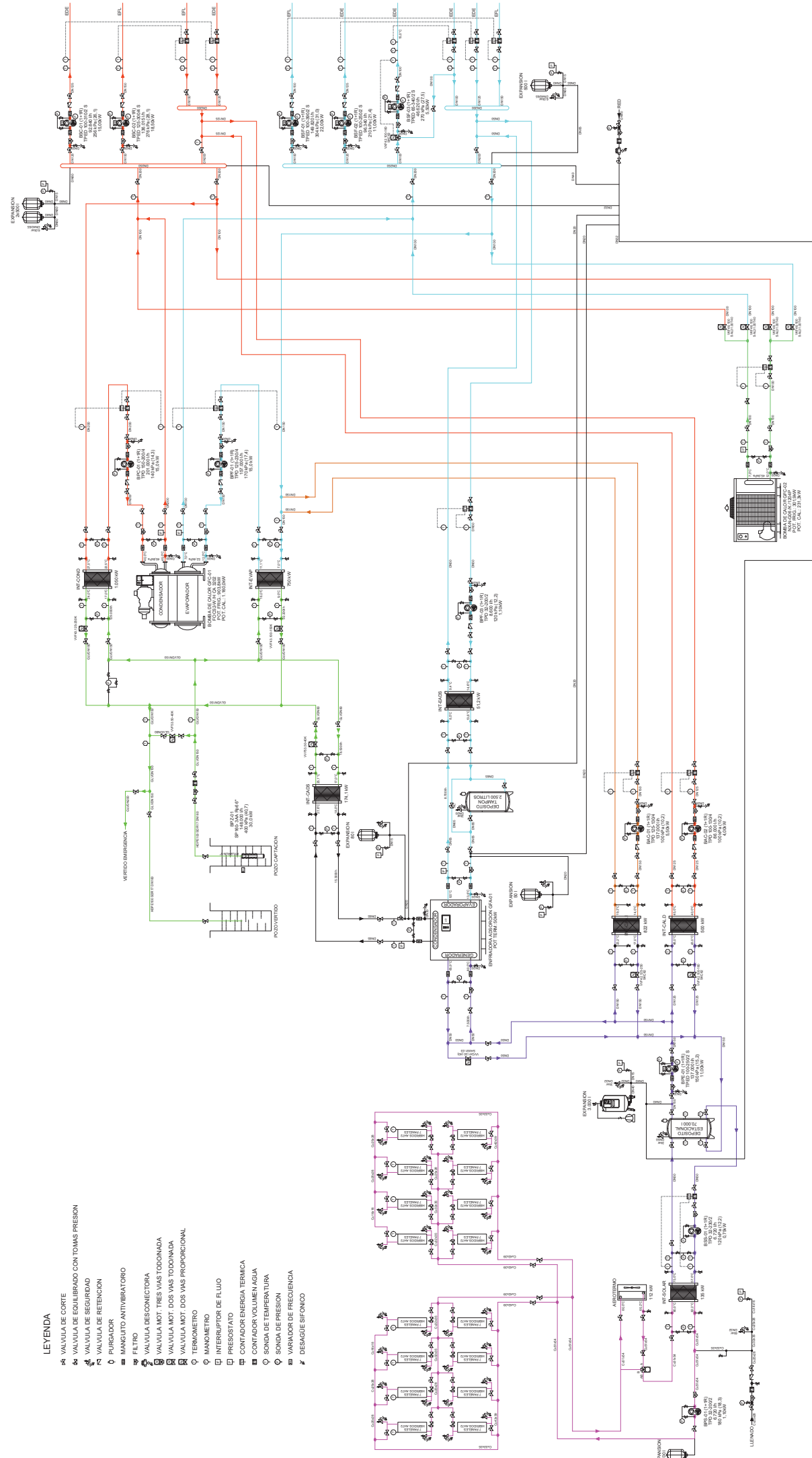
- [33] Francisco Javier Rey Martínez and Eloy Velasco Gómez. *Bombas de calor y energías renovables en edificios*. Ediciones Paraninfo, SA, 2005.
- [34] Víctor Nieto Soto and María Belén Zalba Nonay. Auditorías energéticas. Caso práctico sobre bomba de calor de la instalación didáctica de climatización en la Universidad de Zaragoza. 2019.
- [35] Zheng Wang, Mark B Luther, Mehdi Amirkhani, Chunlu Liu, and Peter Horan. State of the art on heat pumps for residential buildings. *Buildings*, 11(8):350, 2021.
- [36] S Rasoul Asaee, V Ismet Ugursal, and Ian Beausoleil-Morrison. Techno-economic feasibility evaluation of air to water heat pump retrofit in the canadian housing stock. *Applied Thermal Engineering*, 111:936–949, 2017.
- [37] Uğur Çakır, Kemal Çomaklı, Ömer Çomaklı, and Süleyman Karşlı. An experimental exergetic comparison of four different heat pump systems working at same conditions: As air to air, air to water, water to water and water to air. *Energy*, 58:210–219, 2013.
- [38] Miklós Kassai. Heat pump heating system development of educational building based on energy, economical and environmental impacts. *Periodica Polytechnica.Engineering.Mechanical Engineering*, 63(3):207–213, 2019. Copyright - Copyright Periodica Polytechnica, Budapest University of Technology and Economics 2019; Última actualización - 2023-12-01.
- [39] Ana María Carnicer Velarte, Amaya Martínez Gracia, and Alejandro García Gil. Estudio de instalaciones geotérmicas de baja entalpía basadas en la tecnología de bomba de calor agua-agua y su afección térmica en el acuífero de Zaragoza. 2017.
- [40] Piotr Boruta, Tomasz Bujok, Łukasz Mika, and Karol Sztekler. Adsorbents, working pairs and coated beds for natural refrigerants in adsorption chillers—state of the art. *Energies*, 14(15):4707, 2021.
- [41] JM Rey Hernández, SL González González, JF San José Alonso, A Tejero González, E Velasco Gómez, and FJ Rey Martínez. Design and characterization of a geothermal earth-air heat exchanger (eahx), applied to nzeb building. IX Congreso Ibérico | VII Congreso Iberoamericano de las Ciencias y Técnicas . . . , 2018.
- [42] Isabel Edo Escudero and María Belén Zalba Nonay. Estado del arte de intercambiadores de calor tierra-aire. Implementación de un software de prediseño. 2021. Aporta material físico (pen drive) en secretaría.

# **Anexo I**

**Plano General del Sistema Primario de Climatización del Edificio de la Facultad de Filosofía y Letras**

**LEYENDA**

- ⊕ VALVULA DE CORTE
- ⊕ VALVULA DE EQUILIBRADO CON TOMAS PRESION
- ⊕ VALVULA DE SEGURIDAD
- ⊕ VALVULA DE RETENCION
- ⊕ PURGADOR
- ⊕ MANSUETO ANTIVIBRATORIO
- ⊕ FILTRO
- ⊕ VALVULA DESCONECTORA
- ⊕ VALVULA MOT. TRES VIAS TODONADA
- ⊕ VALVULA MOT. DOS VIAS TODONADA
- ⊕ VALVULA MOT. DOS VIAS PROPORCIONAL
- ⊕ TERMOMETRO
- ⊕ INTERRUPTOR DE FLUJO
- ⊕ PRESOSTATO
- ⊕ CONTADOR ENERGIA TERMICA
- ⊕ CONTADOR VOLUMEN AGUA
- ⊕ SONDA DE TEMPERATURA
- ⊕ Sonda de Presion
- ⊕ VARIADOR DE FRECUENCIA
- ⊕ DESAGUE SIFONICO



Documentación Final de Obra: Plano A4-Built  
**REFORMA Y AMPLIACIÓN DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS DE LA UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA.**  
 Pedro Chubera s/n, Campus San Francisco, Universidad de Zaragoza  
 ABRIL 2023

**CLIMATIZACIÓN ESQUEMA DE PRINCIPIO EDE.I.C.19**

UTE MAGÉN ARQUITECTOS S.P.L-INGENIERIA TORNÉ S.L. ESCALA  
 ARQUITECTOS: FRANCISCO MAGÉN PARDO  
 MAGÉN ARQUITECTOS S.P.L.  
 INGENIERO INDUSTRIAL: SERGIO TORRE DARRIBA  
 INGENIERIA TORNÉ S.L.