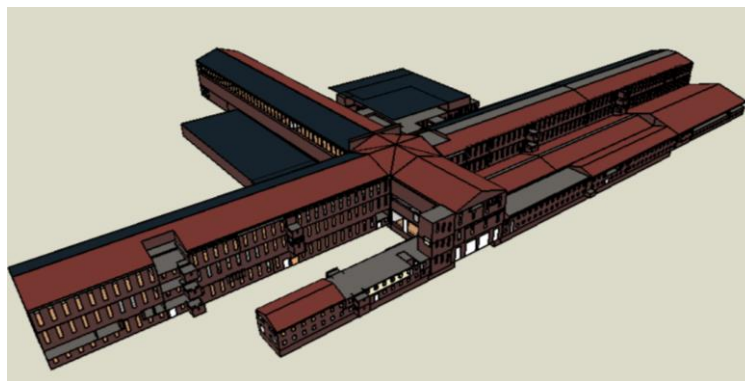


MÁSTER UNIVERSITARIO en Investigación en Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Industria, Transporte, Edificación y Urbanismo

# TRABAJO FIN DE MASTER

## *ESTUDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ALJIBE A MODO DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO EN EL EDIFICIO IWER*



**Estudiante:** Pablo Moreno Pestaña

**Director/Directora:** Gonzalo Diarce Belloso

## I. Resumen trilingüe (castellano/euskera/inglés) + palabras clave

Es bien sabido que el calentamiento global y partiendo de él la eficiencia energética es uno de los campos más urgentes de investigación científica e ingenieril de este siglo. En el contexto europeo, un 40% del consumo energético proviene de edificios y de estos un 40% corresponde a edificios del sector terciario, en un parque de edificios europeo y español envejecido. Para plantear soluciones innovadoras a este problema se realiza el programa europeo oPEN Lab, donde se estudiarán intervenciones en edificios con necesidad de renovación innovadora, y en este trabajo se planteará el caso de estudio concreto del edificio Iwer en Pamplona que pertenece a este proyecto por el interés que da su situación: posee un amplio aljibe subterráneo. Este edificio se ha planteado intervenir a nivel energético una instalación fotovoltaica en cubierta así como de sistemas de climatización mediante bombas de calor de alta eficiencia, sistemas que en los últimos años han probado en la literatura y en proyectos existentes buenas prestaciones. Estos sistemas sin embargo se ven limitados por la necesidad de las bombas de calor de seguir la demanda del edificio, lo que provoca arranques, paradas y funcionamientos a carga parcial que son indeseables, así como obliga a dimensionar la bomba de calor para cargas máximas. Una solución existente es el uso de un tanque de agua como tanque de acumulación térmico que permita desvincular la producción del consumo. Estos sistemas además permiten el uso de diferentes estrategias de control: respecto a la producción fotovoltaica para aumentar el uso de energía renovable o un ahorro económico al variar el consumo de red en función del precio. Sin embargo estudios de esta tecnología y sus aplicaciones están hasta ahora centrados en el sector residencial, y las ventajas del almacenamiento térmico no se pueden obtener con las mismas herramientas cuando el edificio es del sector terciario, y especialmente donde la curva de demanda es dependiente de diferentes usos. Es aquí donde esta investigación plantea mediante el uso del software Design Builder un análisis de un posible sistema de HVACR del edificio a renovar aprovechando un ya existente aljibe como un TES (Thermal Energy Storage). Los resultados de este trabajo han mostrado como los beneficios de la acumulación térmica estudiados en el sector de la vivienda pueden también reproducirse en el complejo Iwer que se ha estudiado logrando una reducción de potencia instalada del hasta el 18% y un ahorro energético desde el 5% al 10% según la estación.

It is well known that global warming and, hence, energy efficiency is one of the most pressing fields of scientific and engineering research of this century. In the European context, 40% of energy consumption comes from buildings and of these 40% corresponds to buildings in the tertiary sector, in an aging European and Spanish building stock. To propose innovative solutions to this problem, the European program oPEN Lab is being carried out, where interventions in buildings in need of innovative renovation will be studied, and in this work the specific case study of the Iwer building in Pamplona will be presented, which belongs to this project due to its interesting situation: it has a

large subway cistern. This building has been considered to implement a photovoltaic installation on the roof as well as HVACR systems using high efficiency heat pumps, systems that in recent years have proven good performance in the literature and in existing projects. However, these systems are limited by the need for the heat pumps to follow the demand of the building, which causes undesirable start-ups, shutdowns, and partial load operation, as well as forcing the heat pump to be sized for peak loads. An existing solution is the use of a water tank as a thermal energy storage (TES) that allows decoupling production from consumption. These systems also allow the use of different control strategies: with respect to photovoltaic production to increase the use of renewable energy or economic savings by adjusting the grid consumption according to the cost. However, studies of this technology and its applications are so far focused on the residential sector, and the advantages of thermal storage cannot be obtained with the same tools when the building is in the tertiary sector, and especially where the demand curve is dependent on different uses. It is here where this research proposes through the use of Design Builder software an analysis of a possible HVACR system of the building to be renovated taking advantage of an existing cistern as a storage tank. The results of this work have shown how the benefits of thermal storage studied in the housing sector can also be reproduced in the Iwer complex that has been studied achieving a reduction of installed power of up to 18% and energy savings from 5% to 10% depending on the season.

Gauza jakina da berotze globala eta horretatik abiatuz energia-eraginkortasuna mende honetako ikerketa zientifiko eta ingeniartzaren alorrik premiazkoenetako bat dela. Europako testuinguruan, energia-kontsumoaren % 40 eraikinetatik dator, eta horietatik % 40 hirugarren sektoreko eraikinei dagokie, Europako eta Espainiako eraikin zahartuen parke batean. Arazo horri irtenbide berritzaileak emateko, oPEN Lab programa europarra egiten da, non berrikuntza berritzailea behar duten eraikinetan esku-hartzeak aztertuko diren, eta lan honetan Iruñeko Iwer eraikinaren azterketa zehatza planteatuko da, proiektu honetakoa baita bere kokapenak ematen duen interesagatik: lurpeko uraska zabala du. Eraikin honen asmoa da estalkiko instalazio fotovoltaiko bat eta eraginkortasun handiko bero-ponpen bidezko klimatizazio-sistemak energian esku hartzea. Sistema horiek literaturan eta lehendik dauden proiektuetan probatu dituzte azken urteotan. Hala ere, sistema horiek mugatuta daude bero-ponpek eraikinaren eskaerari jarraitu behar diotelako, eta horrek karga partzialeko abiarazteak, geldialdiak eta funtzionamenduak eragiten ditu, nahi ez direnak, eta bero-ponpa gehieneko kargetarako dimentsionatzera behartzen du. Dagoen soluzio bat da metagailu termiko gisa ur-tanga bat erabiltzea, ekoizpena eta kontsumoa bereizi ahal izateko. Sistema horiek, gainera, kontrol-estrategia desberdinak erabiltzea ahalbidetzen dute: ekoizpen fotovoltaikoari dagokionez, energia berriztagarriaren erabilera handitzeko, edo aurrezpen ekonomikoari dagokionez, sarearen kontsumoa prezioaren arabera aldatzen baita. Hala ere, teknologia horri eta haren aplikazioei buruzko azterlanak bizitegi-sektorean zentratuta daude orain arte, eta biltegitratze termikoaren abantailak ezin dira tresna berdinekin lortu eraikina hirugarren



sektorekoa denean, eta bereziki eskariaren kurba erabilera desberdinen mende dagoenean. Ikerketa honek, Design Builder softwarearen bidez, berriztatu beharreko eraikinaren HVACR sistema posible baten analisia planteatzen du, lehendik dagoen ur-tanga bat erabiliz. Lan horren emaitzek erakutsi dutenez, etxebizitzaren sektorean aztertu diren metaketa termikoaren onurak lurreratu konplexuan ere ugaltzea daitezke, eta, horrela, instalatutako potentzia % 18raino murrizten da eta energia % 5etik % 10era aurrezten da estazioaren arabera.

**Palabras clave: “Bomba de calor”, “Almacenamiento térmico”, “Eficiencia energética”.**

## II. Índice

<b>I. Resumen trilingüe (castellano/euskera/inglés) + palabras clave</b> .....	<b>I</b>
<b>II. Índice</b> .....	<b>IV</b>
<b>III. Lista de tablas, ilustraciones, gráficas y acrónimos</b> .....	<b>VI</b>
III.1. Lista de tablas. ....	VI
III.2. Lista de figuras .....	VI
III.3. Acrónimos .....	VIII
<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Análisis del estado del arte</b> .....	<b>2</b>
<b>3. Objetivos y alcance del trabajo</b> .....	<b>8</b>
<b>4. Beneficios que aporta el trabajo</b> .....	<b>8</b>
<b>5. Relación con los ODS</b> .....	<b>8</b>
<b>6. Descripción del caso de estudio.</b> .....	<b>9</b>
6.1. Descripción del edificio de estudio. Iwer. ....	9
6.2. Software utilizado. Design Builder. ....	11
6.3. Modelo de la envolvente térmica del edificio. ....	12
6.4. Perfiles de actividad. Cálculo de la demanda. ....	14
6.5. Generación fotovoltaica .....	19
6.6. Diseño de HVACR sin almacenamiento .....	21
6.7. Diseño de HVACR con almacenamiento .....	26
6.8. Dimensionamiento y operación de HVACR. Análisis estacional y control de consignas. ....	29
<b>7. Análisis de los resultados</b> .....	<b>35</b>
7.1. Reducción de potencia de bombas de calor mediante uso del aljibe como tanque de acumulación.....	35
7.2. Uso de consignas de ahorro: Comparativa para diferente potencia instalada. ....	42
7.3. Resultados que no varían y no existentes .....	43
7.4. Aumento de consumo total al usar almacenamiento. Disminución del COP por aumento de salto térmico. ....	44
7.5. Resultado de uso de estrategias de control de consignas en verano. Aprovechamiento fotovoltaico. ....	45
7.6. Resultado de uso de control consignas en invierno. Control según precio de electricidad. ....	46
7.7. Resultado de uso de control consignas en otoño. Consignas mixtas. ....	47
<b>8. Conclusiones y líneas futuras</b> .....	<b>50</b>
<b>9. Planificación del trabajo</b> .....	<b>52</b>
9.1. Descripción de tareas, fases, equipos o procedimientos.....	52
9.2. Diagrama de Gantt: .....	52
<b>10. Descargo de gastos</b> .....	<b>53</b>
10.1. Horas internas .....	53
10.2. Amortizaciones .....	53



10.3. Resumen del descargo de gastos.....	54
<b>11. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO I: Posible uso como disipador de calor. ....</b>	<b>57</b>
<b>ANEXO II: Diseño avanzado de HVACR. ....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO III: Validación de curvas de potencia producida y demanda satisfecha de los modelos estudiados. ....</b>	<b>64</b>
<b>ANEXO IV: Validación de temperaturas por zona.....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXO V: Resultados extra de ahorro en verano. Límite por temperatura de congelación. ....</b>	<b>69</b>

### III. Lista de tablas, ilustraciones, gráficas y acrónimos

#### III.1. Lista de tablas.

Tabla 1: Consumo total en semana de estudio(kWh) .....	43
Tabla 2: Consumo de red en semana de estudio (kWh).....	43
Tabla 3: Gasto económico en semana de estudio (€).....	43
Tabla 4: Desglose de horas internas .....	53
Tabla 5: Desglose amortizaciones .....	53

#### III.2. Lista de figuras

Figura 1: Esquema de planta del aljibe.....	2
Figura 2: Tipología de energía solar asistida por bomba de calor [14] .....	3
Figura 3: Esquema de tipología PV/T (Photovoltaic + Thermal) de un sistema con bomba de calor [15] .....	4
Figura 4: Ahorro energético en función del tamaño del tanque de acumulación [18].....	5
Figura 5: Vista de localización edificio Iwer. En amarillo sección que no se renovará.	10
Figura 6: Parte de la fachada del edificio Iwer .....	11
Figura 7: Vista renderizada del modelo en Design Builder del edificio Iwer.....	12
Figura 8: Vista de sección de muros exteriores en plantilla "Medium weight, moderate insulation" .....	13
Figura 9: Tabla actividad metabólica extraída de UNE-EN ISO 8996 presente en la guía de aplicación del DBHE [33] .....	16
Figura 10: Perfil de ocupación de oficina estándar TH-BCE-2012.[34].....	16
Figura 11: Valores de iluminación en lux y potencia de luminarias extraídas de la guía de aplicación del DBHE.[33] .....	17
Figura 12: Carga interna de equipos.....	18
Figura 13: Tabla a-Anejo D. DBHE. Consignas de temperatura.....	19
Figura 14: Potencial fotovoltaico del complejo Iwer. Cortesía del proyecto OPEN Lab .....	20
Figura 15: Modelo en Design Builder para de la instalación fotovoltaica.....	21
Figura 16: Esquema de sistema HVACR sin almacenamiento .....	23
Figura 17: Sistema de calefacción con almacenamiento .....	25
Figura 18: Sistema de refrigeración sin almacenamiento .....	25
Figura 19: Sistema de calefacción con almacenamiento .....	27
Figura 20: Sistema de refrigeración con almacenamiento .....	29
Figura 21: Diagrama de bloques de algoritmo para obtener la reducción de potencia mediante uso de almacenamiento .....	31
Figura 22: Diagrama de bloques de simulaciones para control de consigna por exceso de fotovoltaica.....	33
Figura 23: Discriminación horaria de precios PVPC España .....	34
Figura 24: Diagrama de bloques de simulaciones para control de consigna por coste de electricidad.....	35



Figura 25: Comparativa de potencia nominal instalada sin almacenamiento y con almacenamiento. ....	36
Figura 26: Curvas de potencia de bombas de calor sin almacenamiento en semana de invierno .....	37
Figura 27: Curvas de potencia de bombas de calor con almacenamiento en semana de invierno .....	38
Figura 28: Curvas de potencia de bombas de calor sin almacenamiento en semana de verano.....	39
Figura 29: Curvas de potencia de bombas de calor con almacenamiento en semana de verano.....	40
Figura 30: Curvas de potencia otorgada en semana de invierno de sistemas con almacenamiento con 3 bombas de calor y sin almacenamiento con 4 bombas de calor...41	41
Figura 31: Curvas de potencia otorgada en semana de verano de sistemas con almacenamiento con 3 bombas de calor y sin almacenamiento con 4 bombas de calor...41	41
Figura 32: Consumo total con 4 bombas instaladas para las diferentes configuraciones.....	44
Figura 33: Consumos de red en semana de verano .....	45
Figura 34: Costes económicos de consumo en semana de invierno con precios de 2022.....	46
Figura 35: Costes económicos de consumo en semana de invierno con precios de 2023.....	47
Figura 36: : Consumos de red en semana de otoño .....	49
Figura 37: Costes económicos de consumo en semana de otoño.....	49
Figura 38: Diagrama de Gantt de tareas del trabajo .....	53
Figura 39: Formas habituales de intercambiador de calor con el terreno [20] .....	58
Figura 40: Temperaturas del condensador enterrado y COP del sistema proyectados a 20 años para un sistema de bomba de calor con condensador enterrado [37]. ....	59
Figura 41: Parte de suministro del circuito de aire .....	60
Figura 42: Parte del circuito de condensación .....	61
Figura 43: Parte del circuito de absorción de calor para calefacción .....	62
Figura 44: Circuito de ACS .....	63
Figura 45: Curvas de potencia otorgada en semana de invierno de sistemas con almacenamiento con 3 bombas de calor y sin almacenamiento con 4 bombas de calor...64	64
Figura 46: Curvas de potencia otorgada en semana de verano de sistemas con almacenamiento con 3 bombas de calor y sin almacenamiento con 4 bombas de calor...65	65
Figura 47: Curvas de potencia otorgada en semana de invierno para todos los modelos estudiados. ....	66
Figura 48: Curvas de potencia otorgada en semana de verano para todos los modelos estudiados. ....	66
Figura 49: Curvas de potencia otorgada en semana de otoño para todos los modelos estudiados. ....	67
Figura 50: Histograma de diferencia de temperaturas de la misma zona en casos de mínima potencia sin y con almacenamiento en semana de invierno.....	68





Figura 51: Histograma de diferencia de temperaturas de la misma zona en casos de mínima potencia sin y con almacenamiento en semana de verano.....	68
Figura 52: Temperatura del tanque y potencia de bombas de calor en semana de verano con uso de consignas. ....	70

### III.3. Acrónimos

HVACR: Heating Ventilation Air Conditioning Refrigeration. Calefacción ventilación aire acondicionado y refrigeración.

TES: Thermal Energy Storage, almacenamiento de energía térmica.

ACS: Agua Caliente Sanitaria.

COP: Coefficient Of Performance. Coeficiente de operación.

PCM: Phase Change Materials. Materiales de cambio de fase.

## 1. Introducción

El calentamiento global es una de las problemáticas más importantes a nivel científico, ingenieril y social de este siglo. Dentro de las muchas formas de luchar contra el mismo se encuentra la eficiencia energética: la reducción del gasto de energía mediante un mejor y optimizado uso de la misma [1]. En este contexto, los edificios son consumidores de un 40% de la energía en Europa y de un 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero [2].

Esto ha llevado a un desarrollo desde el comienzo del siglo de medidas de ahorro y eficiencia energética en edificación, especialmente en la renovación energética de edificios antiguos con pobres prestaciones térmicas. Las medidas que mayor éxito han presentado son aquellas de colaboración científica y social, con financiación y ayudas a nivel de gobierno o europeo [3].

Dentro del parque de edificación existente los edificios destinados al sector terciario en España son responsables de cerca del 40% del consumo de los edificios [4] y su consumo final de energía ha crecido en un 20.9% entre 2000 y 2019, incluso tras aplicar medidas de mejora de eficiencia energética [5]. Al mismo tiempo el uso de renovables, principalmente fotovoltaica en la edificación, así como tecnologías de mayor rendimiento como las bombas de calor se han aplicado de forma extendida tanto en el sector terciario como en el de vivienda y han provocado su electrificación [5]. Esta mayor electrificación ha derivado en un auge de tecnologías de almacenamiento de energía: baterías, almacenamiento térmico, etc. por dos factores diferentes: Una incertidumbre sobre el precio e impacto ambiental de la electricidad consumida y una curva de demanda muy variable al funcionar con electricidad todos los sistemas de los edificios, incluyendo HVACR que es muy dependiente de las condiciones climáticas [6].

El sector residencial ha aprovechado su alto uso de ACS para usar la acumulación de agua caliente como almacenamiento térmico que aproveche la instalación de renovables en el edificio (Tanto solar térmica como solar fotovoltaica). También es un sector con acceso a baterías eléctricas de capacidades razonables para satisfacer el consumo de viviendas [7,8]. Mientras tanto el sector terciario, con una baja demanda de ACS y demandas eléctricas muy grandes para el uso de baterías eléctricas, está dando tan solo sus primeros pasos en almacenamiento tanto de calor como especialmente poco estudiado de frío para HVACR [9].

Se remarca como de especial importancia la necesidad de adaptar las estrategias de control del sistema de almacenamiento para explotar al máximo sus beneficios como se recoge en [10] y para esto se realizará un análisis en un caso de estudio real. Es en este contexto nace el proyecto oPEN Lab. El proyecto oPEN Lab tiene como objetivo principal la mejora de edificios y distritos existentes en tres barrios de las ciudades europeas de Tartu, Pamplona y Genk para alcanzar barrios de energía neta positiva operacionales [11]. Esta investigación existe en el crisol del proyecto de rehabilitación de un complejo en el barrio elegido de Pamplona: el complejo Iwer. Esta edificación es un emblemático complejo industrial que se renovará para reavivar el barrio poniendo instalaciones de viviendas, residencias, gimnasio, supermercados y oficinas.

A nivel energético, esta renovación tiene como objetivos principales y que afecten a este trabajo:

- Con una gran inversión en fotovoltaica tanto integrada como superpuesta alcanzar una masa crítica de generación de energía urbana que sirva de generador en una microrred en el barrio.
- Realizar una renovación energética innovativa en el edificio usando técnicas y tecnologías avanzadas para tanto analizar como cubrir la demanda tanto eléctrica como térmica del edificio.

Por lo tanto se tiene un complejo industrial a renovar con una amplia cubierta disponible para una instalación fotovoltaica y la intención de aplicar técnicas innovadoras para cubrir demanda, en concreto para satisfacción de HVACR se decidió por comité usar bombas de calor de alta eficiencia. Finalmente respecto a la realidad del edificio en lo pertinente a este estudio, se encuentra en el subterráneo del edificio un aljibe cuyas dimensiones se pueden ver en la Figura 1.

El centro de este trabajo será la propuesta del uso de almacenamiento térmico de este aljibe con consecuencias positivas y dará el requerimiento a las tecnologías planteadas de poder aprovechar un tanque de almacenamiento subterráneo.

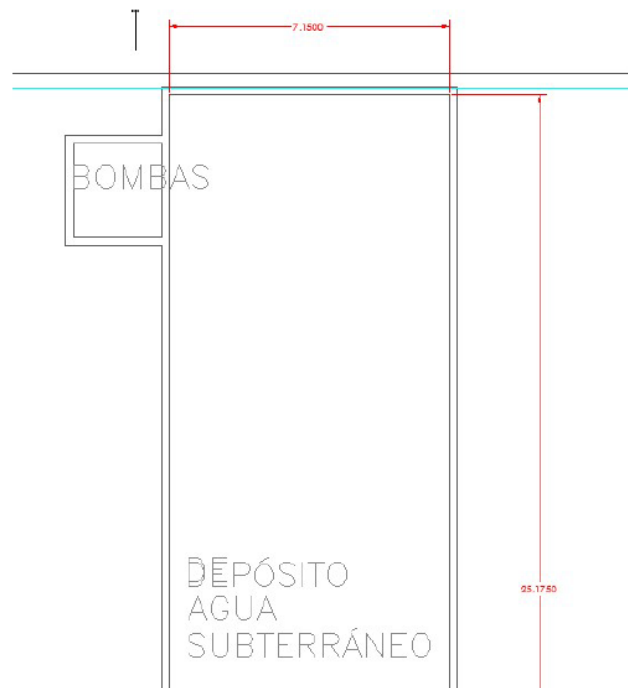


Figura 1: Esquema de planta del aljibe

## 2. Análisis del estado del arte

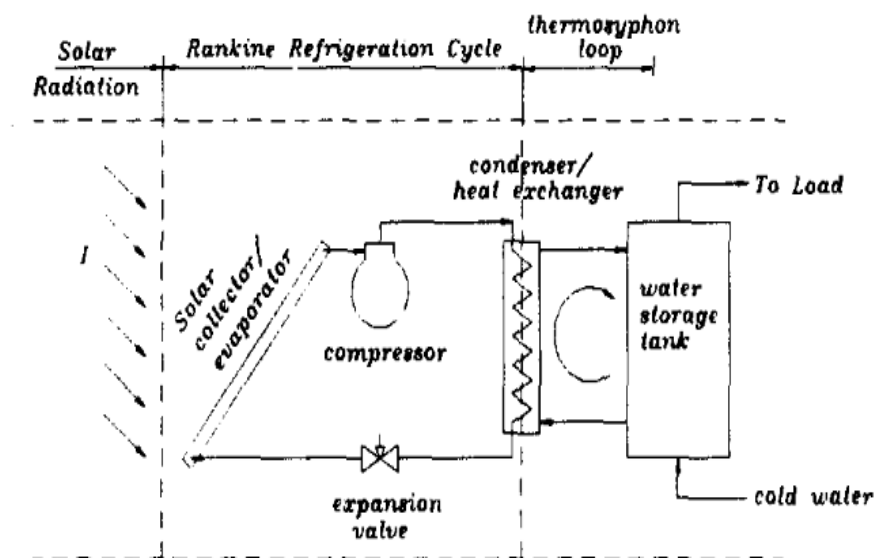
Habiendo situado el contexto en la renovación energética de un edificio del sector terciario con bombas de calor y aplicación de tecnología fotovoltaica así como almacenamiento térmico será el estado del arte de la combinación de estas tecnologías el que se analice. Una tecnología que permite generar tanto frío como calor con muy alto rendimiento y promoviendo la electrificación y que además ha demostrado en la literatura y en la práctica muy buenas prestaciones son las bombas de calor [12].

Las bombas de calor usadas para refrigeración, calefacción y ACS en edificios asistidas por energía solar (tanto fotovoltaica como térmica y la combinación de ambas) es un campo de estudio en desarrollo actualmente por su alta eficiencia y amplia cantidad de tipologías.

Respecto al tipo de bombas de calor utilizadas en edificación, el fluido que usan generalmente puede ser aire o agua, y estas bombas obtienen el nombre “bombas aire-aire” o en inglés “air source o air-to-water”, y bombas agua-agua o en inglés “wáter source o wáter-to-water”.

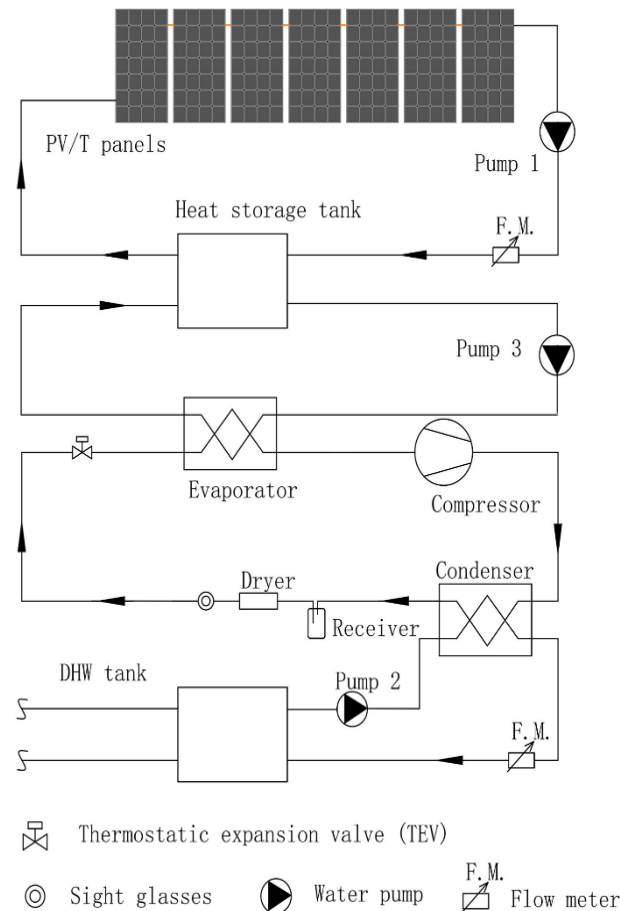
Habitualmente las bombas de calor usadas en estas instalaciones urbanas son de aire, pero las instalaciones con bombas de agua tienen la ventaja de tener menor tamaño en tuberías, menor tamaño de intercambiadores y mayor rendimiento a largo plazo. Pero se ven limitadas por una mayor inversión inicial debida principalmente a los dispositivos de evacuación de calor, así como la instalación en si misma [13]. Es por ello que los sistemas de almacenamiento térmico se benefician de bombas de calor agua-agua.

Explicando algunas de las tipologías existentes de sistemas con bombas de calor independientemente de su fluido de trabajo podemos encontrar sistemas solares con asistencia por bomba de calor donde la bomba de calor aporta un salto extra de temperatura a un sistema de energía solar térmica como se ve en la Figura 2 [14]. Este sistema tiene aplicaciones en sistemas de energía térmica donde el salto de temperatura es más alto de lo que los colectores pueden obtener.



**Figura 2: Tipología de energía solar asistida por bomba de calor [14]**

Otro ejemplo de una tipología de instalaciones con bombas de calor es la de bomba de calor con instalación fotovoltaica y/o térmica. Un esquema de esta tipología para generación de agua caliente se puede ver en la Figura 3. Esta tipología gracias al alto grado de aprovechamiento de energías renovables permite alcanzar reducciones de consumo energético así como ahorro económico [15].



**Figura 3: Esquema de tipología PV/T (Photovoltaic + Thermal) de un sistema con bomba de calor [15]**

En cuanto a bombas de calor para refrigeración en lugar de calefacción, el esquema de las instalaciones es el mismo.

Todos estos sistemas pueden tener la presencia o no de un sistema de almacenamiento térmico (TES). Un TES en un sistema de calefacción, refrigeración o ACS por bomba de calor consiste en un depósito térmicamente aislado del exterior que contiene una sustancia de alta capacidad térmica para que la generación de calor o frío se vuelque sobre este acumulador. Cuando la demanda lo exige se extrae calor o frío del TES para satisfacer la demanda del edificio. La sustancia a usar por su facilidad de uso, precio, respeto medioambiental y tecnología existente es el agua, pero existen otros modelos con tanques de PCM (Phase Change Materials) para cuando se requiere aun mayor capacidad térmica y el volumen es limitante [16]. Es importante remarcar que la sustancia de acumulación del tanque no tiene porque ser el fluido de trabajo de la bomba de calor, ya que según el tipo de tanque, este puede ser cargado y descargado a través de intercambiadores de calor [17]. Para entender los beneficios del uso de un tanque de acumulación en un sistema con bomba de calor, se explicarán primero algunas debilidades de los sistemas de bombas de calor sin acumulación.

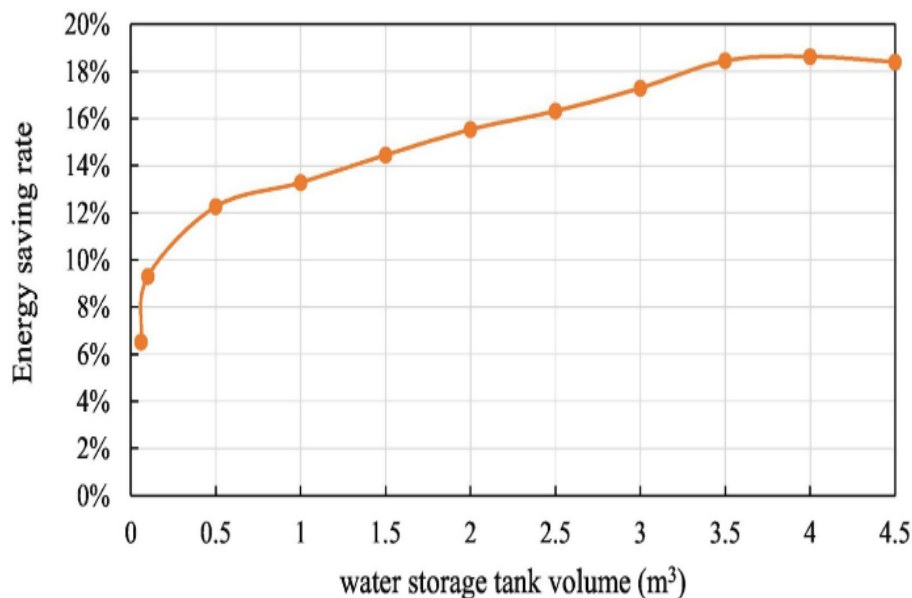
Si la bomba de calor funciona sin tanque de almacenamiento significa que la carga térmica del edificio está siendo cubierta a tiempo real por una bomba de calor que va a encenderse o apagarse y a cambiar su potencia prácticamente minuto a minuto. Además, el dimensionamiento de la

potencia máxima de la bomba de calor está directamente ligado a la carga máxima del edificio: La bomba de calor debe dimensionarse para cubrir la carga pico, por ejemplo en verano en el día más caluroso con la mayor actividad en el edificio, aunque en un gran porcentaje de horas del año no opere a carga máxima sino parcial [18].

Esto deriva en una bomba de calor de alto coste y sobredimensionada respecto a la carga media, ya que su potencia máxima se aprovecha pocas horas del año, y además disminuye el COP de la bomba debido a arranques y paradas habituales y a un régimen de carga que no es el nominal, lo que además lleva a un desgaste mayor.

Estas debilidades se pueden paliar con un TES. La bomba de calor alimenta al TES y el TES alimenta a la demanda, de manera que en primer lugar la bomba de calor ya no necesita dimensionarse a la carga máxima y puede dimensionarse a una carga menor, y en segundo lugar, puede operar siempre a carga nominal. En [18] estudiaron en concreto este fenómeno con diferentes tamaños de tanque de almacenamiento como TES, encontrando que existe un posible ahorro energético de hasta cerca de un 20%, gracias al aumento del COP estacional por funcionar en potencia nominal en lugar de en potencias variables. También se encontró que se reducen el número de arranques y paradas, y con esto las pérdidas asociadas a los mismos.

Este resultado se puede ver en la Figura 4, donde el ahorro energético aumenta conforme se aumenta el tamaño del tanque de acumulación hasta llegar a estabilizarse.



**Figura 4: Ahorro energético en función del tamaño del tanque de acumulación [18].**

En la referencia [19] se reprodujeron resultados parecidos mediante MATLAB, usando un tanque de acumulación tanto para calor como para frío en una instalación con bombas de calor y fotovoltaica, y se consiguió una reducción de carga máxima y por tanto de potencia instalada, así como un mayor rendimiento.

Si el tamaño del tanque se eleva en cantidades importantes, de forma que el calor o frío almacenado puede durar varios días o incluso semanas o meses de consumo, lo que se obtiene es

un tipo de almacenamiento llamado almacenamiento estacional. Este tipo de almacenamiento puede venir en diferentes tamaños y en diferentes formas de acumulación, pero el modo principal es el almacenamiento subterráneo donde el calor generado usualmente por energía solar térmica es almacenado durante el verano para ser usado durante invierno [20]. Este tipo de almacenamiento es más propio de edificios con alta necesidad de calefacción en climas muy fríos, pero existen proyectos existentes incluso en la zona de Euskadi [21,22]

Para un almacenamiento estacional el tamaño puede ser tal como para alimentar a un sistema de calefacción de nivel de distrito [23], pero las condiciones necesarias para esto no se dan en el aljibe estudiado porque no es lo suficientemente grande respecto al edificio.

En cambio, el estudio y uso de un tanque de tamaño mediano o pequeño como acumulador de calor y/o de frío, acoplado o no a un sistema de generación de energía renovable, tiene más recorrido y, por los tamaños que se manejan [17,18], es más adecuado para el caso de estudio.

Continuando con el uso del aljibe como tanque de acumulación, se ha establecido previamente que la generación y el consumo (carga y descarga) del sistema de calefacción o refrigeración quedan ahora separados gracias a la existencia del TES. La generación ya no tiene que coincidir en tiempo o potencia con la demanda instantánea. Esto permite el desplazamiento de las horas de trabajo de la bomba de calor a cuando sea preferible, siempre que el balance global de energía y las condiciones de confort se sigan manteniendo.

Esto es especialmente importante en sistemas con producción fotovoltaica, ya que al contrario de la producción solar térmica que puede almacenarse en paralelo al funcionamiento de la bomba de calor, la producción fotovoltaica requiere de encender y hacer funcionar la bomba de calor para aprovechar la energía. Esto significa que, de tener una estrategia de control para la bomba de calor y el acumulador que tenga en cuenta la producción fotovoltaica, se puede lograr que la bomba de calor tenga un consumo eléctrico con mayor origen renovable que de usar un control que no tenga en cuenta la energía fotovoltaica [24].

Existen diversas posibles estrategias de control para lograr este mayor aprovechamiento de energía fotovoltaica, pero en este trabajo se realizará una basada en las siguientes extraídas de A. Heinz. Et al [25]. En el estudio citado, Heinz and Rieberer plantean las siguientes estrategias y otras que no se usarán en este estudio de control de bombas de calor coordinadas con la producción fotovoltaica:

- Estándar. La bomba de calor funciona según una serie de consignas independientes de la producción fotovoltaica. Si la bomba de calor funciona mientras existe producción fotovoltaica con esta estrategia de control es una coincidencia.
- Ventana de tiempo. Es un esquema similar al estándar, donde las consignas de la bomba de calor dependen solo de temperaturas del tanque de acumulación, pero esta vez solo se permite a la bomba operar durante horas de alta radiación (Y con ello producción fotovoltaica) en los paneles instalados. Esta estrategia tiene un mayor ahorro energético

- que la estándar, ya que asegura que la bomba de calor funciona cuando hay energía fotovoltaica disponible pero se arriesga a que los consumos fuera de horas de sol sobrecalienten o subenfrien los tanques de refrigeración y calefacción respectivamente.
- Sobrecarga: Fuera de las horas de sol, es la misma estrategia que la estándar, donde una serie de consignas de temperatura del tanque indican a la bomba de calor si activarse o desactivarse, pero durante las horas de producción fotovoltaica o cuando el sistema detecta producción fotovoltaica, depende de la complejidad del sistema, las consignas de temperatura varían de forma que la bomba sobrecarga al tanque, por ejemplo si su temperatura máxima en calefacción por consigna son 50°C se puede llevar hasta 55°C para aumentar la energía fotovoltaica aprovechada.

En global en el artículo citado se encontró que el ahorro energético tan solo con variación de las estrategias de control podía alcanzar el 4%.

Otra estrategia probada especialmente por baterías en el sector residencial pero también mediante almacenamiento térmico es adaptar el consumo de electricidad al precio de la electricidad de red, de forma que se fomente el consumo en horas de bajo precio y se eviten las horas de precios altos obteniéndose una reducción de costes de electricidad [26–29].

Revisando publicaciones previas hasta donde los autores han podido encontrar, estas técnicas de acumulación térmica y estrategias de control han sido estudiadas principalmente en el sector de la vivienda. Las herramientas usadas para estos estudios cuando se ha analizado una curva de demanda son softwares de cálculo como Matlab donde la reproducción de comportamientos térmicos complejos de edificios muy grandes es difícil. Exportar estos resultados al sector terciario y la acumulación de calor o de frío para HVACR en un caso real es un campo de investigación novedoso. Como ejemplo de esto se expone la review de sistemas de bombas de calor junto almacenamiento térmico para edificios realizada por [10]. En esta review se analizan más de 40 estudios sobre TES con bombas de calor y tan solo uno de ellos tiene una potencia instalada y un tamaño de tanque de almacenamiento similar a las magnitudes de este estudio (560m<sup>3</sup> y demanda del orden de 1500kW). Este estudio se realizó para un edificio de oficinas en Corea en [30] usando Energy Plus como base de cálculo y con potencias parecidas pero en ese caso no se estudiaron estrategias de control de consignas.

Por lo tanto, la necesidad de realizar este estudio es evaluar los beneficios de la acumulación térmica analizando el caso real del complejo Iwer y su aljibe. Por la complejidad de usos térmicos en el edificio IWER se usará un software de alta potencia de cálculo térmico y eficacia probada como es Design Builder con una forma simplificada de introducir datos térmicos y con modelos de sistemas de producción, materiales, etc. incluidos. Este software usa como base de cálculo Energy Plus para cálculos térmicos.



### 3. Objetivos y alcance del trabajo

El objetivo principal de este trabajo es analizar si los beneficios encontrados en el estado del arte sobre el uso de almacenamiento térmico (TES) se aplicarían al caso de estudio del complejo Iwer usando su aljibe subterráneo como tanque de acumulación mediante el uso de Design Builder como software de cálculo.

Por lo tanto los dos objetivos de este trabajo de investigación son comprobar si mediante el uso del aljibe se puede lograr:

- Reducción de potencia instalada en bombas gracias a peak shaving mediante la energía almacenada en el tanque y estabilización del régimen de la/s bomba/s, menos arranques y paradas, más tiempo a carga nominal al desvincular en parte demanda de consumo.
- Ahorro energético y/o económico mediante uso de estrategias de control en función de la energía fotovoltaica en exceso y el precio de la electricidad.

### 4. Beneficios que aporta el trabajo.

Los beneficios de este trabajo se dividirán en 3 beneficios diferentes: económico, ambiental y de investigación y desarrollo.

El beneficio económico que aporta es una primera estimación de un posible ahorro económico mediante dos efectos: La reducción de potencia instalada en bombas de calor mediante el uso del aljibe que significa menor inversión en bombas de calor y la reducción de consumo de electricidad de red o consumo en horas más baratas lo que reduce el coste de electricidad anual para el complejo tras la rehabilitación.

El beneficio ambiental aparece en el uso de estrategias de control de consignas para aprovechamiento fotovoltaico ya que esto puede llevar a un aumento del autoconsumo y una reducción de consumo eléctrico, lo que reduce la huella de carbono del consumo eléctrico del edificio.

El beneficio de investigación y desarrollo recae en el hecho novedoso del análisis realizado. Usar herramientas de la potencia de Design Builder para analizar la demanda térmica de un edificio complejo, y evaluar en este los beneficios del almacenamiento térmico en un caso real y del sector terciario es un paso adelante en la investigación del almacenamiento térmico. Hasta ahora se ha visto centrada en el sector de la vivienda y en análisis con herramientas más sencillas que eran adecuadas para demandas térmicas menos complejas.

### 5. Relación con los ODS

#### **ODS 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna**

Este trabajo tiene una relación estrecha y directa con el ODS 7 al permitir el desarrollo de las metas:

- 7.2: Aumentar la proporción de energía renovable, gracias a la sincronía entre fotovoltaica y TES con bombas de calor.

- 7.3: Mejorar la eficiencia energética. Mediante ahorro en consumo al usar estrategias de control de consignas del TES.
- 7.a: Aumentar la cooperación internacional para acceso a investigación y tecnologías de energía limpia. Esto se satisface al existir en el contexto del proyecto internacional oPEN Lab.

### **ODS 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles**

Este trabajo tiene una relación cercana con el ODS 11 al desarrollar sus metas:

- 11.1: Especialmente la parte de mejorar los barrios marginales al encontrarse el complejo Iwer en un barrio necesitado y el contexto ser una renovación energética para un edificio social.
- 11.b: Aumentar el número de ciudades que implementan planes integrados que promuevan, entre otros, el uso eficiente de los recursos y la adaptación al cambio climático. Ambas metas se ven satisfechas gracias al uso del aljibe como TES por aportar un aumento de la eficiencia energética reduciendo el consumo eléctrico y aportando resiliencia térmica al edificio. Con una potencia instalada no excesiva se pueden cubrir de forma puntual grandes picos de demanda (Como en olas de calor/frío) y luego cargar durante las horas del día de menos demanda térmica.

## **6. Descripción del caso de estudio.**

### **6.1. Descripción del edificio de estudio. Iwer.**

Se ha presentado previamente el contexto geográfico y de interés social del edificio Iwer de Pamplona, objetivo del análisis de este trabajo en el contexto de una rehabilitación energética, y en este apartado se ahondará en las características físicas del mismo.

Se trata de un emblemático complejo industrial de gran tamaño localizado en el barrio de Rochapea, en Pamplona. En la Figura 5 se puede ver su localización y las dimensiones generales del mismo previas a la renovación energética. El edificio se divide en varias alas y anexos, de los cuales los marcados con una forma amarilla en la figura no formarán parte del edificio renovado final.

Debajo en la figura 6 se aprecia una parte de la fachada del edificio. Este consta de 3 plantas útiles más un sótano en las 3 alas principales y 2 plantas en un edificio anexo. En este trabajo la división futura en diferentes usos de las diferentes plantas y zonas del edificio no es definitiva, así como el uso de locales, potencia fotovoltaica a instalar y en que aguas de la cubierta, etc.

Los subsecuentes apartados de metodología explicarán cuales fueron los modelos usados para reproducir la realidad de este edificio Iwer así como las hipótesis usadas para dicho modelo.

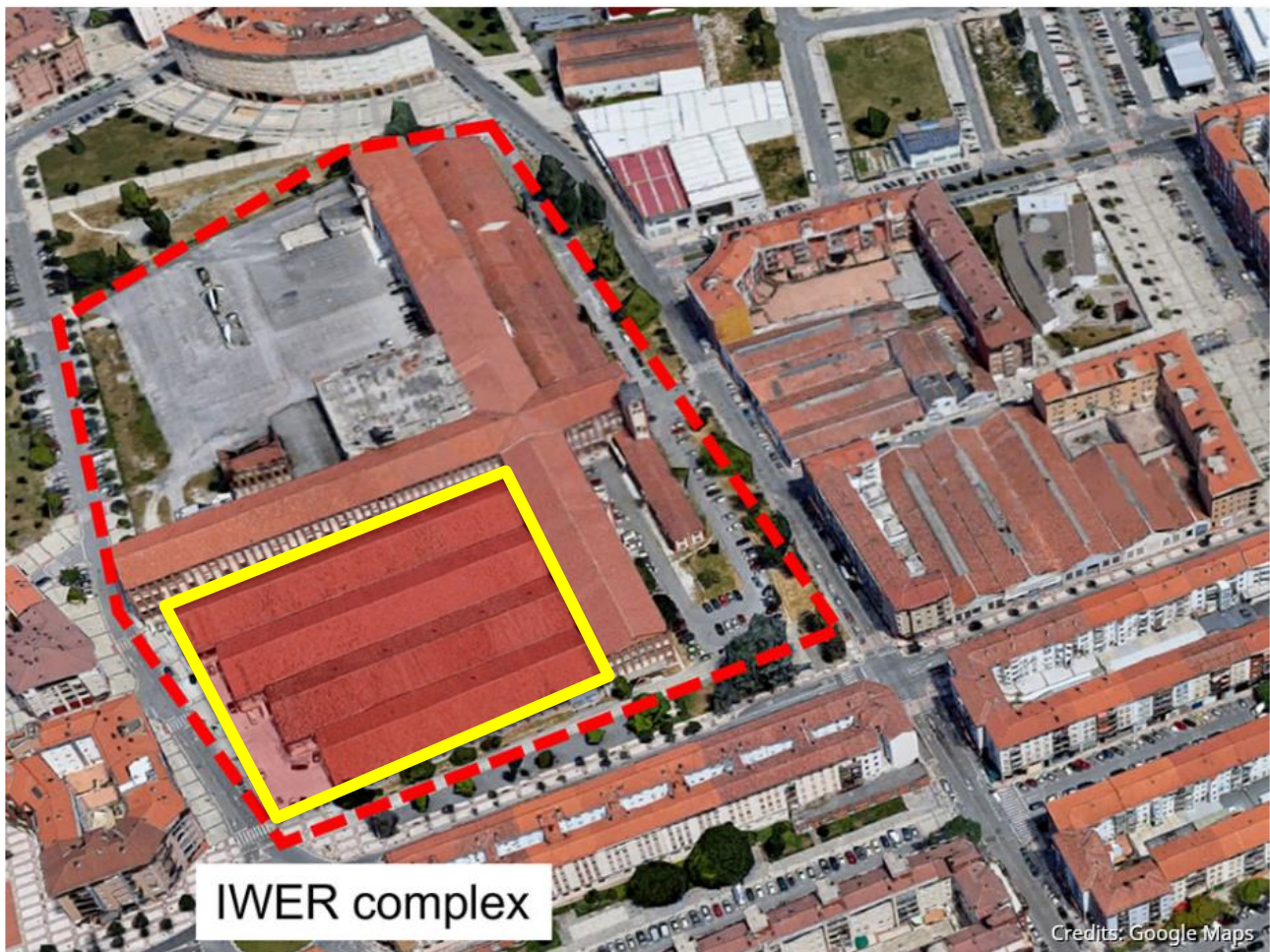


Figura 5: Vista de localización edificio Iwer. En amarillo sección que no se renovará.





Figura 6: Parte de la fachada del edificio Iwer

## 6.2. Software utilizado. Design Builder.

El software principal usado en este trabajo ha sido Design Builder versión 7.0.2.004. Este se ha utilizado para obtener el comportamiento térmico del modelo del edificio Iwer así como todas las simulaciones y diseño del sistema HVACR.

Este software tiene como base de cálculo para cálculos térmicos Energy Plus y tanto esta base de cálculo como los módulos de Design Builder utilizados, con el centro en el módulo de HVAC, otorgan una potencia de cálculo amplia así como verificada y reconocida para el diseño de instalaciones térmicas en edificios. Citando el apartado de características del módulo de HVAC de Design Builder desde su web:

“Entre las características más importantes del módulo HVAC de Design Builder se encuentran las siguientes:

- El motor de EnergyPlus simula el edificio y sus sistemas de manera integrada y simultánea, mejorando la precisión de los cálculos respecto a otros programas que realizan cálculos secuenciales (como DOE2).
-

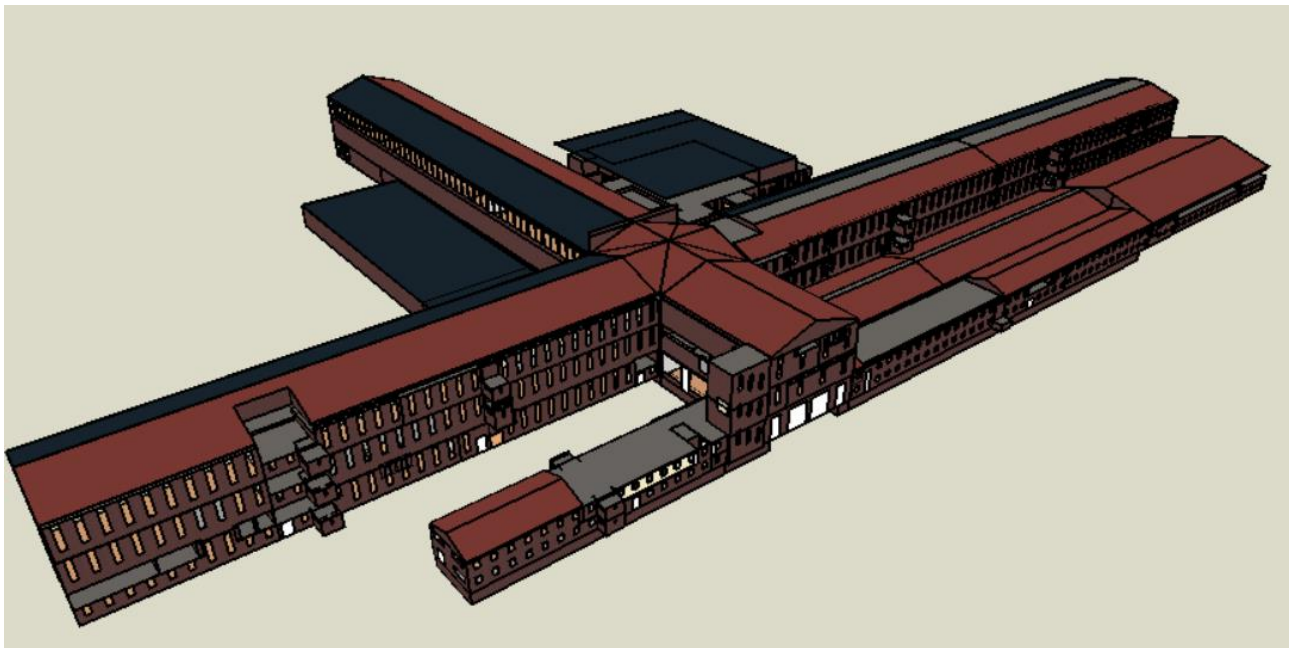
- Se puede definir los sistemas HVAC a partir de un amplio rango de plantillas (con esquemas de principio predefinidos) o bien iniciarlos de cero. Se incluyen plantillas para todos los sistemas HVAC de referencia del estándar ASHRAE 90.1.
- Es posible generar cualquiera de los resultados proporcionados por EnergyPlus, incluyendo las temperaturas de los nodos del sistema, los caudales y los niveles de humedad en intervalos sub-horarios.”[31]

Las especificaciones técnicas usadas para el modelo térmico del edificio se desarrollan en los apartados subsecuentes.

### 6.3. Modelo de la envolvente térmica del edificio.

En primer lugar se debe realizar un modelo en CAD del edificio para su simulación. Este modelo no lo ha creado el autor sino que ha sido realizado previamente en el proyecto mediante el software REVIT y se ha importado siguiendo la guía de importación de REVIT a Design Builder que otorga el desarrollador del software. Posteriormente se pulieron errores en la importación: Geometrías superpuestas, superficies orientadas con su cara exterior hacia el interior, etc. El detalle de esta importación se encuentra en “Design Builder Revit – gbXML Tutorial” como parte de la documentación del software.

Una captura de la vista renderizada del modelo una vez se introducen posteriormente propiedades de superficies se puede ver en la Figura 7. Este modelo no reproduce a la perfección cada zona, pero ya que los cálculos a realizar no tendrán en cuenta CFD sino balances a volúmenes y superficies este modelo es adecuado para las simulaciones deseadas.



**Figura 7: Vista renderizada del modelo en Design Builder del edificio Iwer**  
Un trabajo previo a toda esta importación es la división en “zonas” en REVIT que se convertirán en “bloques” o en “zonas” en Design Builder. Esta división en zonas permite establecer para cada una



diferentes características: Ocupación, actividad, equipos, sistema de HVAC por parte de demanda para satisfacer a dicha zona, etc. La descripción de estas zonas se hará en el próximo apartado ya que se explicará junto a los perfiles de uso que se les han dado a las diferentes zonas. Antes de pasar a ese apartado se continuará describiendo el modelo para la envolvente térmica del edificio y la introducción de potencia fotovoltaica instalada en el mismo.

Para la envolvente térmica del edificio no se ha querido analizar en profundidad el efecto de la rehabilitación energética, y por ello se usó una plantilla de cerramientos existente en Design Builder llamada "Medium weight, moderate insulation". Esta reproduce cerramientos de masa media y aislamiento moderado. Al ser el objetivo de este trabajo comparar 2 sistemas de HVACR donde uno use el aljibe como almacenamiento, mientras ambos modelos usen la misma envolvente térmica los detalles de la misma no son de objeto de estudio.

Se expone a continuación en la Figura 8 el muro exterior usado en dicha plantilla.



**Figura 8: Vista de sección de muros exteriores en plantilla "Medium weight, moderate insulation"**

Las propiedades relevantes de los materiales usados son:

Brickwork outer:

- Conductividad (W/m-K): 0.8400
- Calor específico (J/kg-K): 800
- Densidad (kg/m<sup>3</sup>): 1700

XPS extruded polystyrene:

- Conductividad (W/m-K): 0.0340
- Calor específico (J/kg-K): 1400
- Densidad (kg/m<sup>3</sup>): 35

Concrete block:

- Conductividad (W/m-K): 0.5100
- Calor específico (J/kg-K): 1000
- Densidad (kg/m<sup>3</sup>): 1400

Gypsum plastering:

- Conductividad (W/m-K): 0.4000
- Calor específico (J/kg-K): 1000
- Densidad (kg/m<sup>3</sup>): 1000

El resto de los cerramientos siguen el mismo tipo de tendencia en sus valores térmicos y da de resultado una envolvente térmica estándar donde los resultados de demanda serán adecuados para comparar dos sistemas.

En cuanto a huecos y acristalamiento se ha usado un vidrio de 2 capas de 3 mm de grosor con cámara de aire intermedia. La elección de esto es la misma que la de una plantilla de propiedades medias, los resultados serán conservadores y adecuados para una comparativa entre dos sistemas de HVACR.

Una nota importante es que no se ha introducido control de sombras. La razón es que la carga de simulación crece mucho así como el tiempo de simulación, pero se deja presente y para análisis futuros la introducción de control de sombras en los huecos.

Con esto queda definida la envolvente térmica del edificio con unos valores estándar adecuados para una comparativa de sistemas HVACR que serán el centro de este trabajo.

#### **6.4. Perfiles de actividad. Cálculo de la demanda.**

Para el proceso de importación del modelo CAD del edificio a Design Builder hace falta tener una división en zonas. Esta división puede seguir muchos criterios y en este trabajo se ha seguido el criterio de dividir zonas según su uso principal: Oficinas, pasillos o zonas de paso, residencia de ancianos, gimnasio, locales comerciales. Un estudio pormenorizado de subzonas dentro de estas escapa al alcance de este trabajo, para el cual basta con usos generales por zonas que den de resultado una curva de demanda y consumos precisa a nivel incluso subhorario.

Las diferentes zonas se han dividido según el uso que a día de escritura de este trabajo, se plantean para la renovación energética, lo que da como clasificación:

- Oficinas.
- Locales comerciales.
- Zonas comunes de oficinas (Pasillos y zonas de paso en oficinas).

- Galerías (Largos pasillos que recorren alas completas longitudinalmente)
- Un jardín interior.
- Zonas residenciales de una residencia para la tercera edad.
- Lofts.
- Un parking interior.
- Un gimnasio.

Si se tienen en cuenta las zonas más prominentes por su área y usos:

1. Una gran parte de zonas son oficinas o sus zonas comunes. El uso de estas zonas será el que marque más el consumo y la demanda térmica del edificio.
2. La residencia y los lofts tienen un tamaño considerable como para que el uso residencial del edificio no sea despreciable.
3. Los locales de la planta baja son suficientes en tamaño como para que su presencia afecte al modelo.
4. El resto de las zonas son reseñables por sus características especiales (gimnasio o jardín interior) pero, aunque se tendrán en cuenta sus perfiles de uso de forma individual, no tendrán gran relevancia en el análisis, ya que como se verá posteriormente se simulará todo con un sistema de HVACR central.

Esta división en varias zonas, con diferentes perfiles de uso no despreciables y variados entre sí es una de las razones para elegir el software Design Builder en este trabajo. Obtener una curva de demanda de un edificio grande, con usos variados, en régimen transitorio y con múltiples sistemas funcionando para satisfacer esa demanda e interaccionando es imprescindible. No es razonable a menos que se usen herramientas que simplifiquen la introducción de los datos que se tienen del modelo térmico y simule con un potente motor de cálculo como Energy Plus.

Obtenido un modelo en Design Builder donde las zonas están divididas según su uso general, a continuación se expondrá el modo en que se ha editado los parámetros de carga interna del edificio. El perfil de carga interna usado se adecúa a la normativa actual siguiendo dos documentos: el documento básico DBHE para ahorro de energía del CTE [32] y la guía de aplicación del documento básico DBHE del CTE[33]. Ambos documentos se complementan para indicar valores y perfiles adecuados de actividad que reproduzcan la realidad de una rehabilitación energética.

Las cargas internas más importantes que se han definido manualmente para cada tipo de zona fueron: ocupación, iluminación y equipos; así como hubo que definir el perfil de uso del HVACR. Otros valores (infiltraciones, ventilación, etc.) se han dejado como los predeterminados para cada modelo de zona según el software.

Respecto a la ocupación hacen falta 4 parámetros importantes: tipo de ropa usada (valor "clo"), actividad metabólica, densidad de ocupación y perfil horario de ocupación.

Para el valor de la ropa, la variable "clo" que indica el aislamiento térmico de la misma tiene unos valores genéricos de 1 en invierno y 0.5 en verano, se usaron dichos valores.



Para el valor de actividad metabólica la guía de aplicación del DBHE da la tabla de la Figura 9 extraída de la norma UNE-EN ISO 8996,

Actividad metabólica en función de la actividad	Sensible (W/persona)	Latente (W/persona)	met
Durmiendo	50	25	0,76
Tumbado	55	30	0,86
Sentado, sin trabajar	65	35	1,0
De pie, relajado	75	55	1,3
Paseando	75	70	1,5
Andando:			
a 1,6 km/h	50	110	1,6
a 3,2 km/h	80	130	2,1
a 4,8 km/h	110	180	2,9
a 6,4 km/h	150	270	4,2
Bailando moderadamente	90	160	2,5
Atlética en gimnasio (hombres)	210	315	5,0
Atlética en gimnasio (mujeres)	185	280	
Deporte de equipo masculino (valor medio)	290	430	6,9
Deporte de equipo femenino (valor medio)	260	380	
Trabajos:			
Muy ligero, sentado	70	45	1,2
Moderado (en oficinas: valor medio)	75	55	1,3
Sedentario (restaurante, incluidas comidas)	80	80	-
Ligera de pie (industria ligera, de compras, etc)	70	90	1,6
Media de pie (trabajos domésticos, tiendas, etc)	80	120	2,0
Manual	80	140	2,1
Ligero (en fábrica, solo hombres)	110	185	2,8
Ligero (en fábrica, solo mujeres)	100	165	
Pesado (en fábrica, solo hombres)	170	255	4,0
Pesado (en fábrica, solo mujeres)	150	225	
Muy pesado (en fábrica, solo hombres)	185	285	4,5
Muy pesado (en fábrica, solo mujeres)	165	255	

Figura 9: Tabla actividad metabólica extraída de UNE-EN ISO 8996 presente en la guía de aplicación del DBHE [33]

Para la densidad de ocupación y los perfiles de ocupación, la guía de aplicación del DBHE cita al Th-BCE 2012 que es la normativa técnica francesa e incluso ejemplifica con el caso de una vivienda en el DBHE y con el caso de una tienda de ropa en la guía de aplicación del DBHE. Siendo así el autor toma como una fuente reconocida en España a la norma TH-BCE 2012 para carga ocupación. Se expone a continuación el usado para oficinas:

nom du local	Bureau standart	voir typologie																						
Rat I	0,05	ratio par défaut surface utile du local/surface utile du groupe peut-être nul si niveau P dans typologie. La somme des RatI du groupe est égale à 1																						
<b>taux d'occupation</b>																								
occupant	0,1	Noccnom valeur pour l'heure maximale de l'année, par m <sup>2</sup>																						
	90	W/Noccnom Chaleur moyenne dégagée par un occupant																						
	0,06	kg/h/Noccnom Humidité dégagée par un occupant																						
ratio Noccnom/Noccnom valeur comprise entre 0 et 1 (= 0 en innocc)																								
jour V / heure >	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,57	1	1	0,57	0,57	1	1	1	1	1	0,57	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,57	1	1	0,57	0,57	1	1	1	1	1	0,57	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0,57	1	1	0,57	0,57	1	1	1	1	1	0,57	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0,57	1	1	0,57	0,57	1	1	1	1	1	0,57	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,57	1	1	0,57	0,57	1	1	1	1	1	0,57	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 10: Perfil de ocupación de oficina estándar TH-BCE-2012.[34]

Como segunda comprobación de esta norma, el valor de ocupación de la figura 10 es de 0.1 ocupantes por m<sup>2</sup>, y se extrae esta cita del documento Básico SI en caso de Incendio :“(…) asimilable a la típica de la actividad administrativa o de oficinas (1 persona/10 m2)”[35].

Con esto queda justificada la aplicación de perfiles de carga por ocupación. Este perfil es importante porque es paralelo al perfil de uso de HVACR. Si hay ocupación se aplicará la consigna primaria y si no la hay se aplicará la consigna secundaria.

En cuanto a iluminación se usó como referencia los valores de la guía de aplicación del DBHE presente en la Figura 11. Esto reproduce el comportamiento de luces LED de alta eficiencia.

Zonas o parte del lugar de trabajo	Nivel mínimo de iluminación (lux)
Zonas donde se ejecuten tareas con:	
1º Bajas exigencias visuales	100
2º Exigencias visuales moderadas	200
3º Exigencias visuales altas	500
4º Exigencias visuales muy altas	1.000
Áreas o locales de uso ocasional	50
Áreas o locales de uso habitual	100
Vías de circulación de uso ocasional	25
Vías de circulación de uso habitual	50

La siguiente tabla permite aproximar, para luminarias LED (aprox. 100 lm/W, 2m al plano de trabajo), la potencia disipada (en W/m<sup>2</sup>) a partir de la iluminancia media (lux):

Iluminancia media (lux)	Potencia (W/m <sup>2</sup> )
100	1
200	2
300	3
400	4
500	5
1000	10

**Figura 11: Valores de iluminación en lux y potencia de luminarias extraídas de la guía de aplicación del DBHE.[33]**

Los perfiles de uso de iluminación se han obtenido de la misma norma francesa TH-BCE 2012 que la guía de aplicación del DBHE cita para perfiles de cargas internas.

La carga interna de equipos varía sensiblemente en función del uso de la zona. Una oficina tiene una alta carga interna de equipos respecto a un pasillo o a una residencia, de forma que se han usado valores individuales para cada tipo de zona. Por ello es una carga interna importante a asignar correctamente en un edificio con usos terciarios variados.

Para la carga interna de equipos se han extraído los valores de la guía de aplicación del DBHE que a su vez los extrae de la norma UNE-EN ISO 13790. Estos valores se encuentran en la figura 12.



▪ **Carga interna de equipos:**

Se trata de calcular la carga media de funcionamiento de una semana tipo para el uso previsto del edificio que diferirá, normalmente, de la potencia instalada (suma de las potencias nominales).

La siguiente tabla recoge el flujo medio de calor procedente de los equipos para algunos usos típicos:

Utilización del edificio	Índice medio del flujo de calor debido a los equipos (W/m <sup>2</sup> )
Oficinas	3
Colegios, escuelas	1
Centros de salud	4
Centros de asistencia sanitaria, no clínico	3
Restauración	3
Tiendas	3
Salones de actos	1
Alojamiento, hospedaje	2
Prisiones, penitenciarias	2
Deportes	1

Valores extraídos de la Tabla G.11 de la UNE-EN ISO 13790

**Figura 12: Carga interna de equipos**

El perfil de carga interna de equipos en la guía de aplicación del DBHE se vuelve a citar a la norma francesa TH-BCE-2012 y por tanto al igual que los perfiles de ocupación se han extraído de ella los perfiles de uso de carga interna de equipos.

Finalmente el perfil de uso del sistema de HVACR según cita la norma DBHE:

“Los espacios del modelo térmico tendrán asociadas unas condiciones operacionales y perfiles de uso que se correspondan con el uso concreto de cada espacio.”[32].

Solo se especifican estas condiciones operacionales para el caso del uso residencial privado, y ya que en el alcance de este trabajo el análisis del confort no es profundo se usará el perfil de residencial privado como base para las consignas de temperatura para todas las zonas. Este se ve en la Figura 13.

Este perfil de operación tiene el objetivo de no dejar que la temperatura sea mayor a los 25°C durante el día ni 27°C durante la noche así como que no baje de los 20°C durante el día ni de los 17°C por la noche.

Si se adapta esto a un perfil más genérico, el objetivo es que si hay ocupación la temperatura mínima son 20°C y la máxima 25°C, y que cuando no hay ocupación, o se está durmiendo en caso de residencia, basta con mantener una consigna secundaria que consuma menos energía del sistema HVACR pero deje preparadas las zonas cerca del confort para su uso.

Por tanto la adaptación que se ha hecho en el modelo es que hay dos consignas: principal para cuando hay ocupación y secundaria para cuando no hay ocupación.

Estas consignas son:

- En invierno 20°C de principal y 17°C de secundaria.
- En verano 25°C de principal y 27°C de secundaria.

Con estas consignas el sistema de HVACR tendrá un comportamiento donde los picos de carga se den cuando hay ocupación y la situación de temperatura exterior sea adversa. Además existirá una base de consumo incluso sin ocupación para evitar temperaturas extremas nocturnas que provoquen picos de carga muy altos a primera hora de la mañana.

**Tabla a-Anejo D. Condiciones operacionales de espacios acondicionados en uso residencial privado**

		Horario (semana tipo)			
		0:00-6:59	7:00-14:59	15:00-22:59	23:00-23:59
<b>Temperatura de consigna Alta (°C)</b>	Enero a Mayo	–	–	–	–
	Junio a Septiembre	27	–	25	27
	Octubre a Diciembre	–	–	–	–
<b>Temperatura de consigna Baja (°C)</b>	Enero a Mayo	17	20	20	17
	Junio a Septiembre	–	–	–	–
	Octubre a Diciembre	17	20	20	17

**Figura 13: Tabla a-Anejo D. DBHE. Consignas de temperatura.**

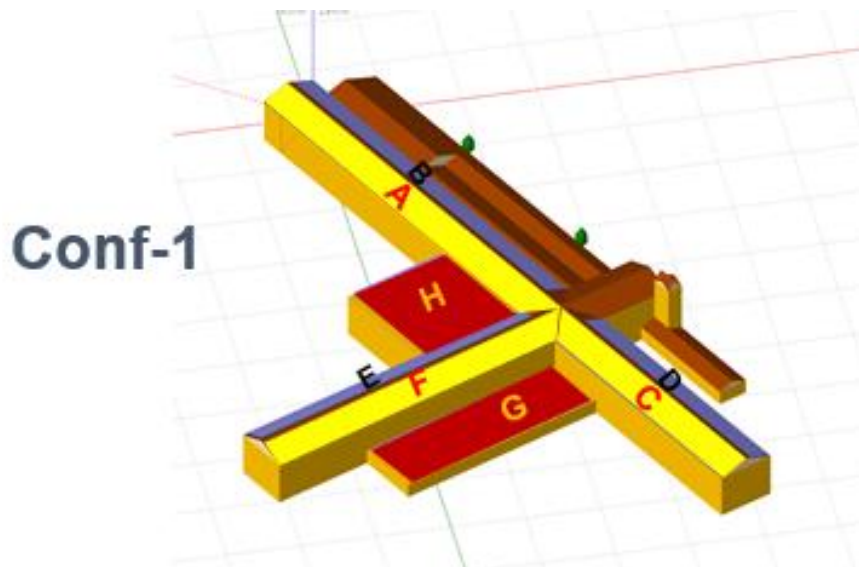
Se deja para trabajos futuros el estudio un modelo de confort más avanzado que este, una definición del resto de variantes de las cargas internas del edificio menos importantes y un control más certero del HVACR en función de ocupación y temperaturas, así como que en un análisis anual se tengan en cuenta periodos vacacionales.

Con esto se tiene un modelo CAD del edificio, su envolvente térmica definida y sus cargas internas establecidas. El siguiente paso será definir el sistema de generación fotovoltaica diseñado en el modelo.

## 6.5. Generación fotovoltaica

Una vez descrito lo necesario para calcular la demanda, se expondrá la instalación fotovoltaica simulada en Design Builder.

Como parte del proyecto se estudió el potencial fotovoltaico del complejo Iwer y se consideró que de todo el área disponible para instalar paneles fotovoltaicos las opciones más factibles serían las cubiertas de la Figura 14. En esta figura se pueden ver 3 grupos de cubiertas: De alto potencial (Letra roja y fondo amarillo: A-C-F), de bajo potencial (Letra negra y fondo azul: B-D-E) y horizontales (Letra amarilla y fondo marrón: H-G).



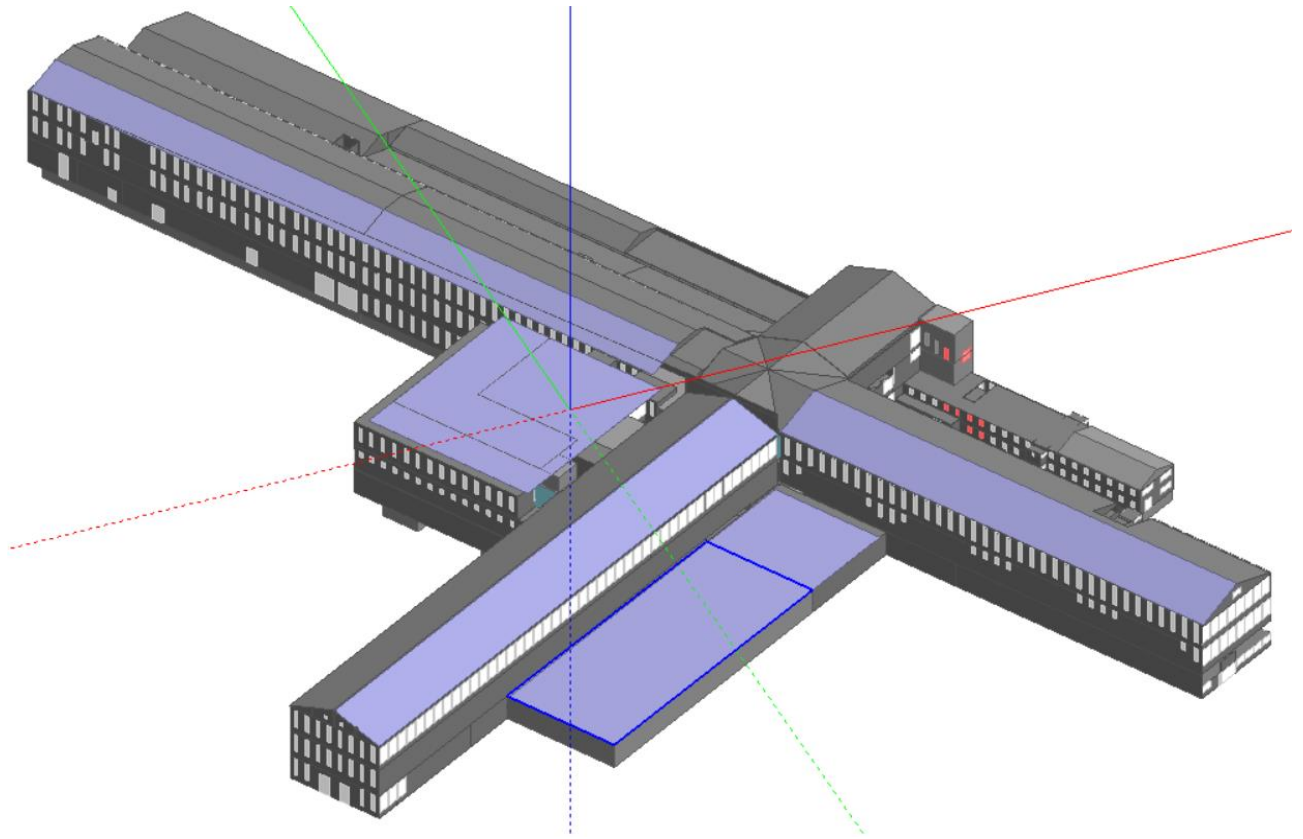
**Figura 14: Potencial fotovoltaico del complejo Iwer. Cortesía del proyecto OPEN Lab**

En las simulaciones para la realización de este trabajo se han considerado las cubiertas A-C-F-G-H, que son aquellas con un potencial mayor de irradiación por  $m^2$ . Se destaca que existe un total de 4 variaciones de inclinación-orientación en esta elección, y la generación fotovoltaica resultante hora a hora dependerá de estas variaciones.

Es importante simular la generación fotovoltaica de forma acertada para un estudio como este donde la precisión horaria de la electricidad generada variará el funcionamiento del sistema. Se verá en los resultados posteriormente que el control del sistema tiene en cuenta cuando sobra energía fotovoltaica, dicho análisis requiere que tanto el consumo como la generación se adecúen a la realidad del edificio.

Para reproducir fielmente esta instalación propuesta se han colocado en el modelo de Design Builder en las mismas cubiertas elegidas colectores solares disponibles en el software. En la Figura 15 se ve el resultado de la colocación de los mismos. La nomenclatura del nombre de cada conjunto corresponde con la Figura 14.





**Figura 15: Modelo en Design Builder para de la instalación fotovoltaica.**

Para la simulación se usaron valores para el panel fotovoltaico de un modelo estándar elegido para este proyecto. Las propiedades introducidas fueron un factor de superficie de 0.9, una eficiencia de celda de 0.215 y una potencia nominal de 250Wp/m<sup>2</sup>.

Usando estos valores para los paneles y el área mostrada la potencia fotovoltaica instalada queda como:

- A 246kW. Inclinación 19 grados Acimut 38 grados este.
- C 161kW .Inclinación 19 grados Acimut 38 grados este.
- F 190kW. Inclinación 19 grados Acimut 90 grados Oeste.
- G 332kW. Inclinación 0.
- H 313kW. Inclinación 0.

Respecto al sistema de conversión cada grupo de paneles tiene asignado un inversor simple de rendimiento constante 0.95 y, de la misma forma que en este estudio el consumo eléctrico y el HVACR es central y común para todas las zonas, la generación fotovoltaica alimenta a todas las zonas indistintamente.

## 6.6. Diseño de HVACR sin almacenamiento

Una vez realizado el modelado de lo necesario para obtener la demanda tanto eléctrica (excepto HVACR) como térmica, se desarrollarán en este apartado los sistemas de HVACR diseñados para satisfacer dicha demanda térmica. Habrá que comparar al menos dos modelos de HVACR: uno sin TES y otro con TES. Por simplicidad y seguir un orden lógico se expondrá a continuación el diseño

de HVACR usando de base el sistema sin TES y posteriormente se explicarán las modificaciones realizadas para añadir la simulación del aljibe como TES.

Para esto se ha usado el módulo de diseño de HVAC avanzado de Design Builder y se explica a continuación el proceso de toma de decisiones para la elección de los diferentes dispositivos y plantillas usados para modelar el sistema de HVACR.

La primera decisión de diseño está tomada como premisa de este trabajo: la producción de HVACR vendrá de bombas de calor. Respecto a que tipo de bombas de calor previamente se ha mencionado en el estado del arte que el almacenamiento térmico se puede hacer con bombas de calor tanto de aire como de agua, pero la programación y el diseño en Design Builder se simplifican bastante si se usan bombas de calor agua-agua. Esta es la razón por la cual se han diseñado los modelos de HVACR usando bombas de calor agua-agua.

Un sistema estándar de HVACR se compone de un mínimo de 2 circuitos: un circuito de producción de calefacción/refrigeración y un circuito de demanda o distribución. En el caso de usar bombas de calor se añade un circuito extra a cada circuito de producción: uno de intercambio de calor con el ambiente. Este sirve para realizar la condensación en refrigeración o la absorción de calor en calefacción, lo que resulta en 5 circuitos para modelar.

Si se usan bombas de calor agua-agua los circuitos de intercambio de calor con el exterior que Design Builder permite usar son variados, y se explica en el ANEXO II: Diseño avanzado de HVACR. por qué se han elegido una torre de refrigeración y un intercambiador de calor enterrado.

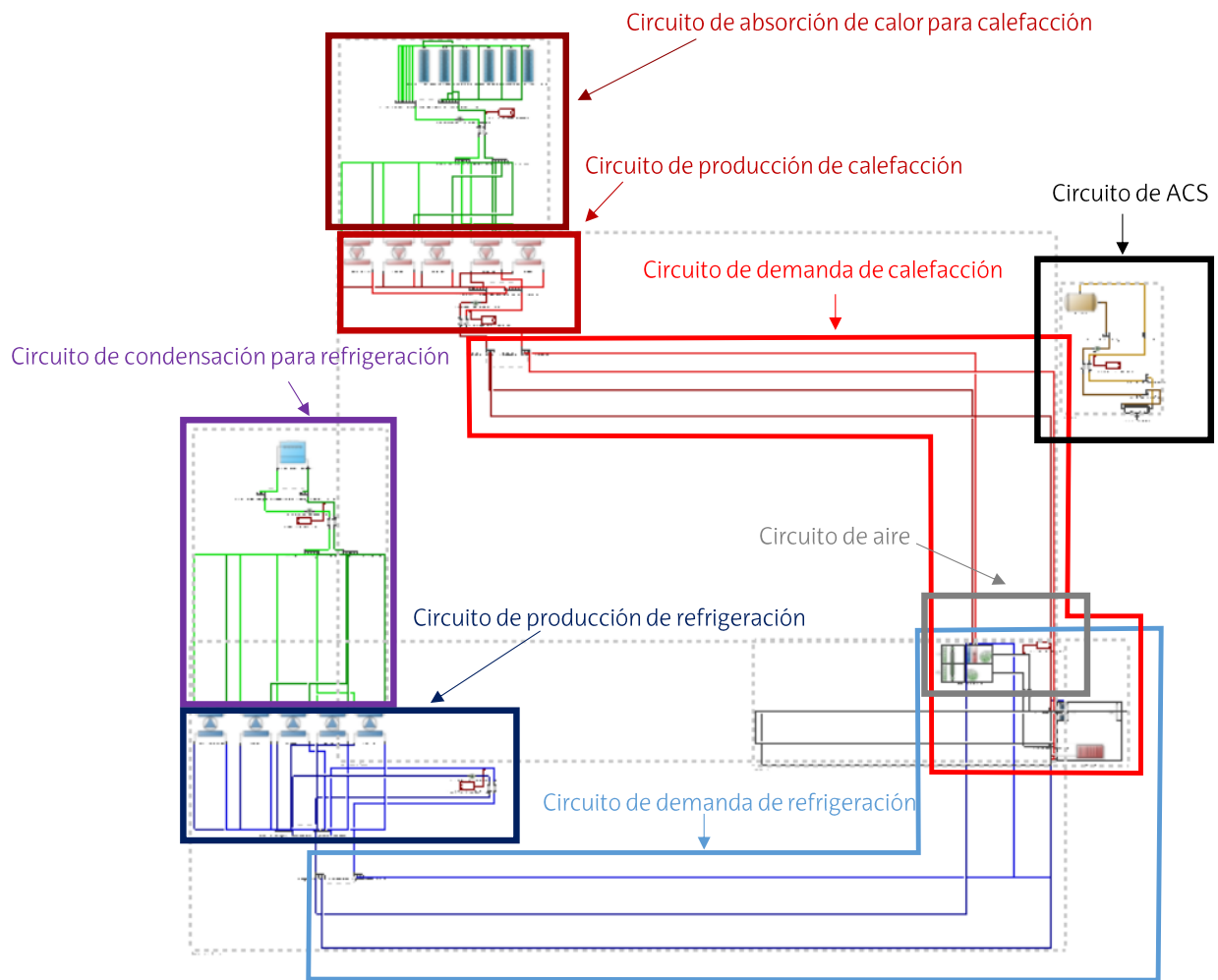
Respecto a los circuitos de demanda o distribución al usar agua como fluido térmico se han usado vigas frías y radiadores como dispositivos de distribución así como UTA's para el tratamiento del aire.

Finalmente y según la instalación, en ocasiones se analiza la producción de agua caliente sanitaria (ACS) junto al sistema de HVACR. En este trabajo la producción de ACS está separada del resto de circuitos y no entra en el alcance de este trabajo su análisis o mejora. Ya que su diseño es necesario para poder realizar simulaciones, se ha usado para este una plantilla estándar existente en Design Builder.

Consecuentemente los circuitos que se han diseñado con el módulo de HVAC avanzado de Design Builder son:

- Circuito de producción de calefacción con bombas de calor agua-agua.
- Circuito de producción de refrigeración con bombas de calor agua-agua.
- Circuitos de demanda de calefacción y de refrigeración.
- Circuito de aire.
- Circuitos de absorción de calor de calefacción y de condensación de refrigeración.
- Circuito de ACS.

Se usará una imagen del sistema sin almacenamiento para mostrar el esquema de todos estos circuitos que se pueden ver en la Figura 16.



**Figura 16: Esquema de sistema HVACR sin almacenamiento**

De estos circuitos los más importantes para este estudio son los circuitos de producción y de demanda de calefacción y de refrigeración ya que serán donde se sitúe el almacenamiento térmico atribuido al aljibe.

El resto de los circuitos bastará con usar plantillas presentes en Design Builder que reproduzcan un comportamiento estándar y que se “autodimensionen”, es decir, que sus flujos de agua, aire, potencia de bombas de circulación, ventiladores, consignas, etc. se dimensionan por si mismos en la simulación o vienen por defecto en valores unitarios estándar. Siendo así se exponen en el “ANEXO II: Diseño avanzado de HVACR.”

### **Circuitos de demanda**

Los circuitos de demanda de calefacción y de refrigeración son los que controlan la temperatura de ida y vuelta del agua del sistema de producción. Este modelo como premisa usa de consignas de calefacción 45°C-40°C y de refrigeración 7°C-12°C. Esto significa que el agua cuando va a demanda y vuelve tiene un salto térmico de 5°C. Esta programación se hace en los circuitos de demanda.

Estos circuitos distribuyen la demanda por zonas con vigas frías para refrigeración y radiadores para calefacción. Las variables de dichos dispositivos se han dejado en su configuración predeterminada exceptuando la temperatura de los radiadores que se ha adaptado a la temperatura de 45°C-40°C del sistema. Además, los circuitos de demanda se conectan con el circuito de aire.



Este diseño deja al modelo con vigas frías, radiadores y aire por UTAs como dispositivos térmicos de distribución. No se ahondará en estos circuitos ya que en este trabajo se analiza en profundidad la parte de producción.

### **Elección de bombas de calor**

Previamente a explicar los circuitos de calefacción y de refrigeración se desarrollará la elección de plantillas de bombas de calor que se han usado en este estudio.

Design Builder trae consigo plantillas de bombas de calor ya existentes y serán estas las que se usen en el trabajo. La plantilla reproduce el comportamiento del modelo “ClimateMaster TMW840” que es la de mayor potencia presente en las plantillas de Design Builder.

Los valores más importantes de la plantilla de estas bombas de calor son, en modo calefacción: un caudal nominal de  $0.013250 \text{ m}^3/\text{s}$ , una capacidad de calefacción nominal de  $389\text{kW}$  en condiciones establecidas y un consumo energético nominal de  $82.9\text{kW}$ . Además son bombas de calor reversibles.

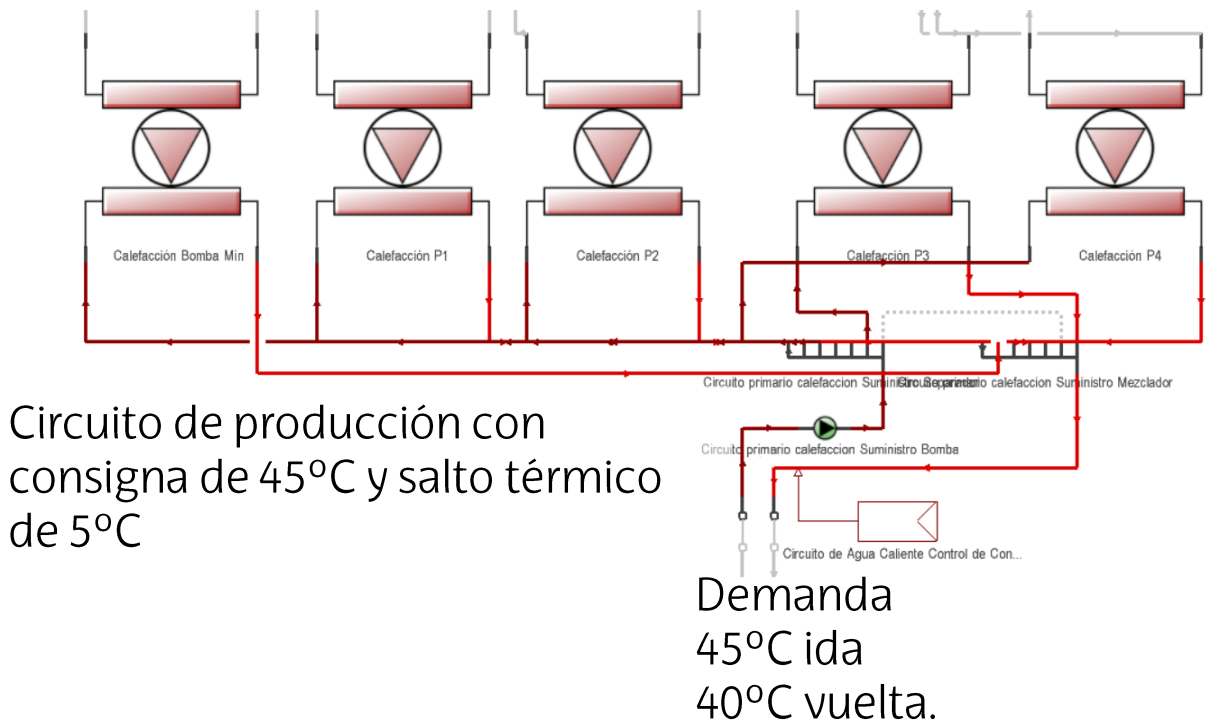
Respecto al número total de bombas de calor reales se ha aprovechado que las usadas en el modelo son reversibles. En su esquema y diseño el modelo tiene un total de  $X$  bombas de calor, siendo  $X$  el número que se esté estudiando en una simulación concreta. Pero la instalación real contaría con tan solo  $X/2$  bombas de calor que según las necesidades térmicas funcionarían en modo de calefacción o modo de refrigeración incluso con simultaneidad. Por ejemplo para reproducir una instalación real de 4 bombas de calor se tendrán 8 en el modelo o incluso más como se verá cuando se añada acumulación, pero se programará su disponibilidad de forma que como máximo estén operando 4 bombas al mismo tiempo. Esto será probado en simulaciones posteriormente y tiene especial importancia la simulación de otoño.

Por cuestiones de simulación se han añadido a calefacción y refrigeración una bomba de calor extra que se ha denominado tipo “mínimas” que no reproducen una bomba de calor real sino que están ahí por limitaciones del software. Su existencia se explica en el “ANEXO II: Diseño avanzado de HVACR”.

### **Circuito de calefacción sin almacenamiento**

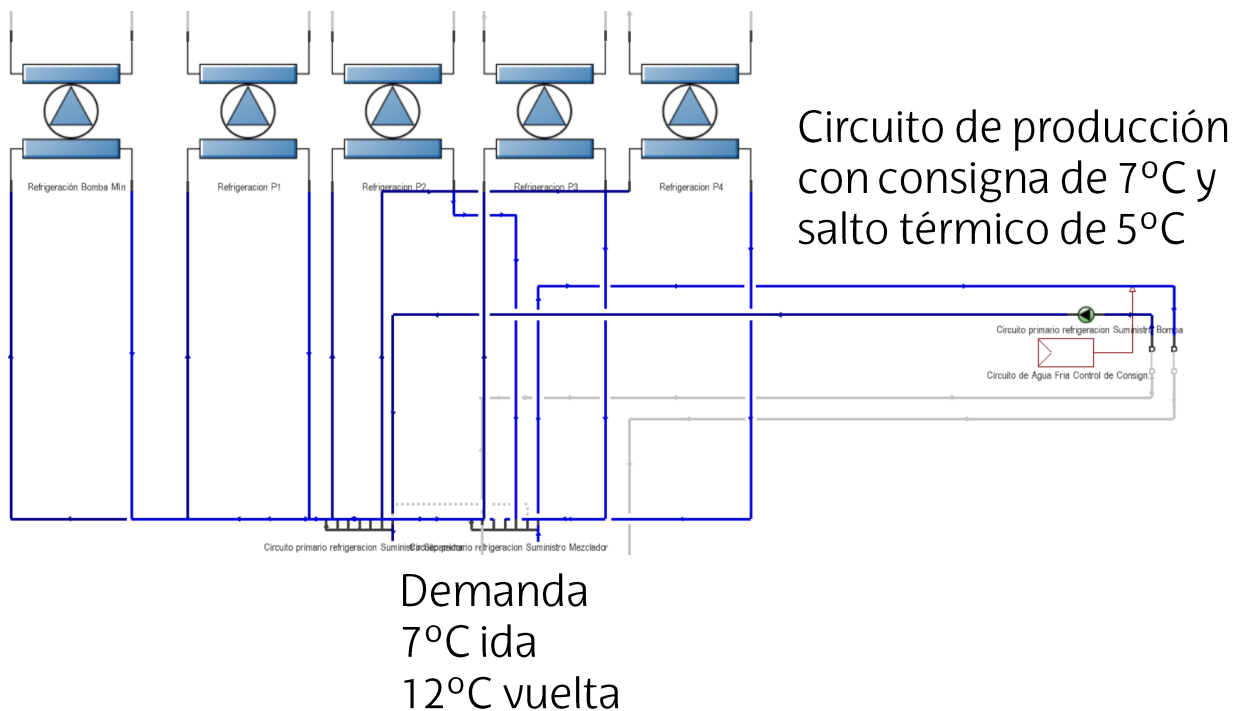
Cuando no se usa almacenamiento térmico las consignas del circuito de producción y del circuito de demanda coinciden. Por ende en el caso del circuito de calefacción la temperatura del agua a salida será  $45^\circ\text{C}$  y a la vuelta será de  $40^\circ\text{C}$ . Estas consignas son las que determinarán el caudal del circuito necesario así como la potencia desarrollada por las bombas de calor.

En la Figura 17 se puede ver el esquema del circuito de producción de calefacción.



**Figura 17: Sistema de calefacción con almacenamiento**  
**Circuito de producción de refrigeración**

Lo explicado en el circuito de producción de calefacción se aplica de forma paralela para el circuito de producción de refrigeración. Las consignas de temperatura son las mismas que las de demanda de refrigeración: 7°C a 12°C, y la plantilla usada para las bombas de calor es el mismo modelo "ClimateMaster TMW840" pero esta vez en modo de refrigeración.



**Figura 18: Sistema de refrigeración sin almacenamiento**

## 6.7. Diseño de HVACR con almacenamiento

El sistema de HVACR con almacenamiento usa como base de su diseño el sistema sin almacenamiento, por lo tanto se omite la descripción de circuitos que no varían entre ambos modelos.

Los circuitos que se ven modificados son:

- Circuito de producción de calefacción. Cambian sus consignas.
- Circuito de demanda de calefacción. Se añade un tanque de almacenamiento.
- Circuito de producción de refrigeración. Cambian algunas de sus consignas y se añade un tanque de almacenamiento.
- Circuito de producción de refrigeración (2). Se añade un segundo circuito de producción de refrigeración.

En la lista de cambios se puede ver como mientras sin almacenamiento calefacción y refrigeración eran paralelos en esquema y funcionamiento una vez se añade almacenamiento los cambios necesarios son distintos. Esto se debe a que en calefacción el almacenamiento térmico se coloca en el circuito de demanda y en refrigeración se coloca en el circuito de producción. No reproduce una realidad física diferente pero son limitaciones del software a las que se deben realizar adaptaciones diferentes.

Algo común en ambos casos es cómo se ha hecho que las plantillas de tanque de almacenamiento se parezcan al aljibe presente en el complejo Iwer. Para esto siempre se usará como tamaño del tanque de almacenamiento el volumen útil del aljibe:  $560\text{m}^3$ , y dado que es largo y poco alto no se considerarán efectos de estratificación sino como tanque mezclado. Dada la naturaleza de este estudio como una prueba de concepto inicial de posibles usos del aljibe, se dejarán como predeterminados los valores de pérdidas de calor a través de las paredes del tanque, lo que deja estas pérdidas como despreciables.

Respecto a caudales de carga y descarga del TES estos deben elegirse adecuadamente. El caudal de carga es claro: debe usarse el mismo o más que el nominal de todas las bombas de calor sumadas. Si no fuese así se estaría limitando la producción por cuestiones de caudal.

El caudal de descarga en cambio puede inicialmente tomar cualquier valor, pero se ha visto en el estado del arte como una de las hipótesis a comprobar es que con menor potencia instalada en bombas de calor se puede satisfacer la misma demanda térmica mediante la descarga del tanque. Por lo tanto el caudal de descarga debe ser mayor al de carga ya que este caudal de descarga del TES es el que controla la potencia térmica máxima del sistema. El valor usado oscila entre el 1.2 y 1.5 veces el caudal de carga del TES según se han ido ajustando las simulaciones.

Añadir un modelo del aljibe como TES tendrá dos consecuencias para los sistemas tanto de calefacción como de refrigeración:

- Las bombas de calor operan con un mayor salto térmico por consigna, esto se verá que reduce el COP de las mismas.

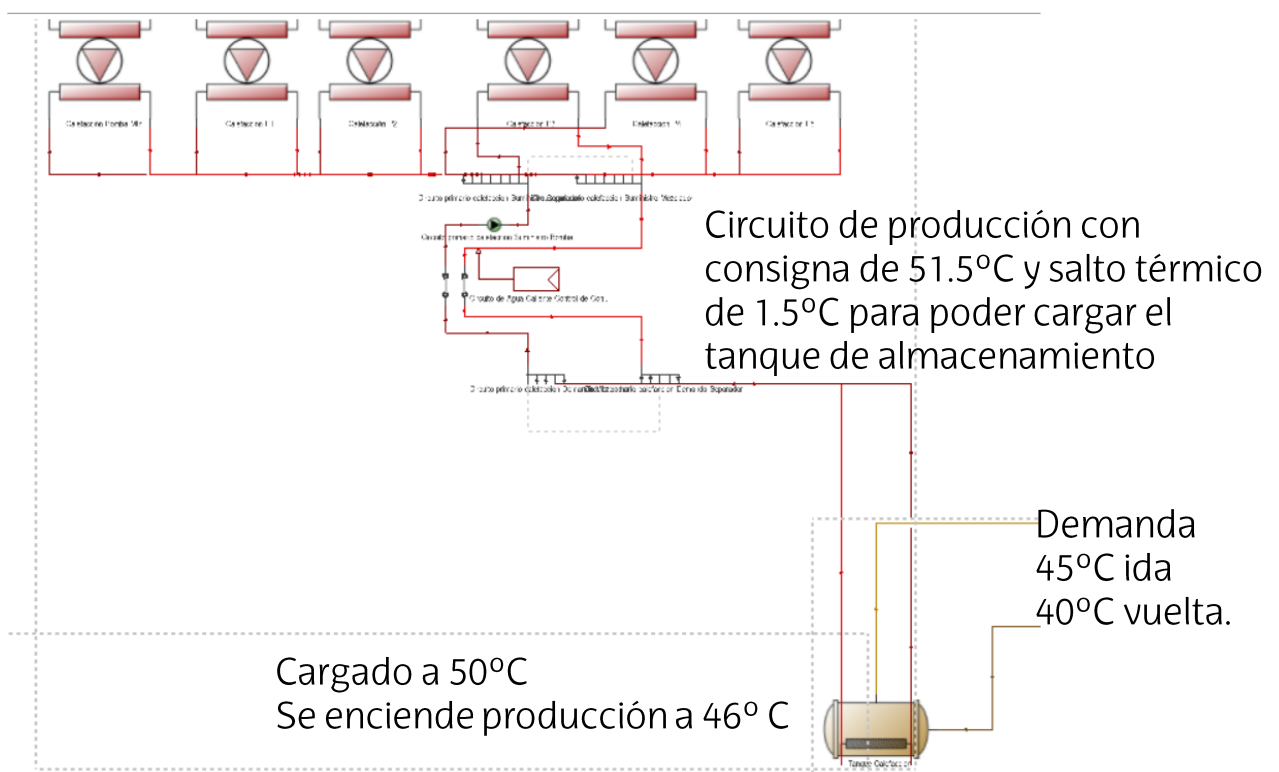
- La demanda y la producción están desvinculadas. El circuito de demanda primero descarga el tanque y solo cuando este está descargado se enciende la producción. De la misma forma puede haber poca demanda y seguir funcionando la producción al máximo porque el tanque no está cargado.

### Calefacción con almacenamiento

Se puede ver en la Figura 19 una imagen del sistema de calefacción con almacenamiento. El tanque de almacenamiento se coloca en el circuito de demanda, aguas abajo del circuito de producción de calefacción. Este tanque de almacenamiento tiene que estar como mínimo a 45°C o una temperatura cercana ya que el agua que posteriormente va a demanda debe estar a 45°C. El tanque puede estar a más de 45°C porque siempre se puede mezclar el agua de vuelta de demanda para enfriarla.

Se ha elegido una consigna de temperatura del tanque de 50°C. A esta temperatura el tanque se considerará “cargado”. Como segunda consigna de control del tanque hace falta conocer a que temperatura se le considera “descargado” y comienzan a funcionar las bombas de calor. Este salto térmico será de 4°C, es decir, a los 46°C el tanque pedirá al circuito de producción que las bombas de calor funcionen para cargarlo de nuevo hasta los 50°C, momento en el que parará el funcionamiento de la producción.

Se puede deducir que si el tanque está a más de 45°C el agua que sale del circuito de producción hacia el tanque también debe estar a más de 45°C para así aumentar su temperatura. Para esto se ha elegido una nueva consigna del circuito de calefacción 51.5°C y un salto térmico de 1.5°C.



**Figura 19: Sistema de calefacción con almacenamiento**

## Refrigeración con almacenamiento

En la Figura 20 está presente el esquema del sistema de refrigeración usando almacenamiento. Las mismas premisas de como diseñar el tanque para que se parezca al aljibe se aplican pero el lugar donde se coloca el tanque es diferente porque así está programado en Energy Plus y en consecuencia en Design Builder. En el caso de refrigeración el tanque se ubica aguas debajo de las bombas de calor en el circuito de producción.

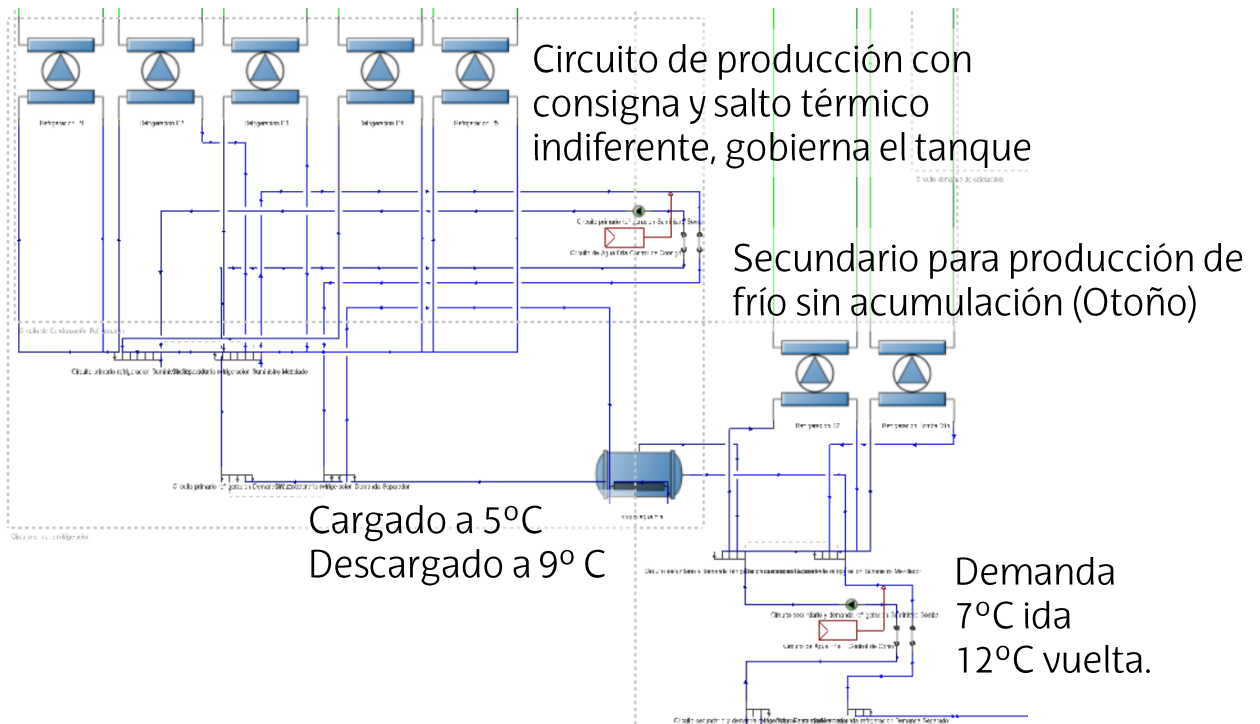
Que el tanque se sitúe en el circuito de producción implica que la consigna de temperatura de agua a salida del circuito de producción no tiene efectos ya que la temperatura a salida del circuito de producción será la que tenga el tanque de almacenamiento.

Este tanque de almacenamiento de frío tiene que estar como máximo a 7°C o cerca de esta temperatura ya que el agua que posteriormente va a demanda debe estar a 7°C o menos.

Se ha elegido una consigna de temperatura del tanque de 5°C. A esta temperatura el tanque se considerará “cargado”. Como segunda consigna de control del tanque hace falta conocer a que temperatura se le considera “descargado” y comienzan a funcionar las bombas de calor. Este salto térmico será de 4°C, es decir, a los 9°C el tanque pedirá al circuito de producción que las bombas de calor funcionen para cargarlo de nuevo hasta los 5°C, momento en el que parará el funcionamiento de la producción.

Nótese como destacable la cercanía a la temperatura de congelación, esto más adelante será una limitación del sistema.

Otro requerimiento del diseño es que las bombas de calor están conectadas en serie con el tanque de acumulación, esto no permite tener simultaneidad de frío y calor ya que el aljibe se usa o para frío o para calor en este estudio. La solución es añadir bombas de calor de refrigeración en un circuito “secundario” cuya función es activarse cuando en la simulación de otoño haya demanda de frío pero el aljibe se use para calefacción.



**Figura 20: Sistema de refrigeración con almacenamiento**

Se destaca que aunque el tanque esté a 9°C descargado y el circuito de demanda exija 7°C la demanda térmica se sigue satisfaciendo gracias a extraer más agua del tanque para compensar la temperatura siendo mayor a la consigna. Ya que en este estudio el análisis de los intercambiadores de calor no es pertinente, este funcionamiento es suficiente y adecuado.

### 6.8. Dimensionamiento y operación de HVACR. Análisis estacional y control de consignas.

En este apartado se describen los métodos usados para el dimensionamiento del sistema de HVACR así como el control de las consignas usado en algunos modelos.

En primer lugar se han elegido los periodos de simulación para este trabajo. Se ha determinado que con 3 periodos de una semana bastará para sacar resultados pertinentes. Estos periodos son:

- Semana de invierno (15 a 22 de Enero). Este periodo determinará el dimensionamiento de calefacción y servirá para analizar estrategias de control con poca producción fotovoltaica.
- Semana de verano (8 al 15 de Julio). Este periodo determinará el dimensionamiento de refrigeración y servirá para analizar estrategias de control con alta producción fotovoltaica.
- Semana intermedia: Otoño. (7 al 14 de Octubre). Este periodo se usará para determinar el efecto de la simultaneidad de calefacción y refrigeración así como analizar estrategias de control mixtas en un periodo donde la carga térmica no es máxima.

El año climático usado para el análisis es 2022.

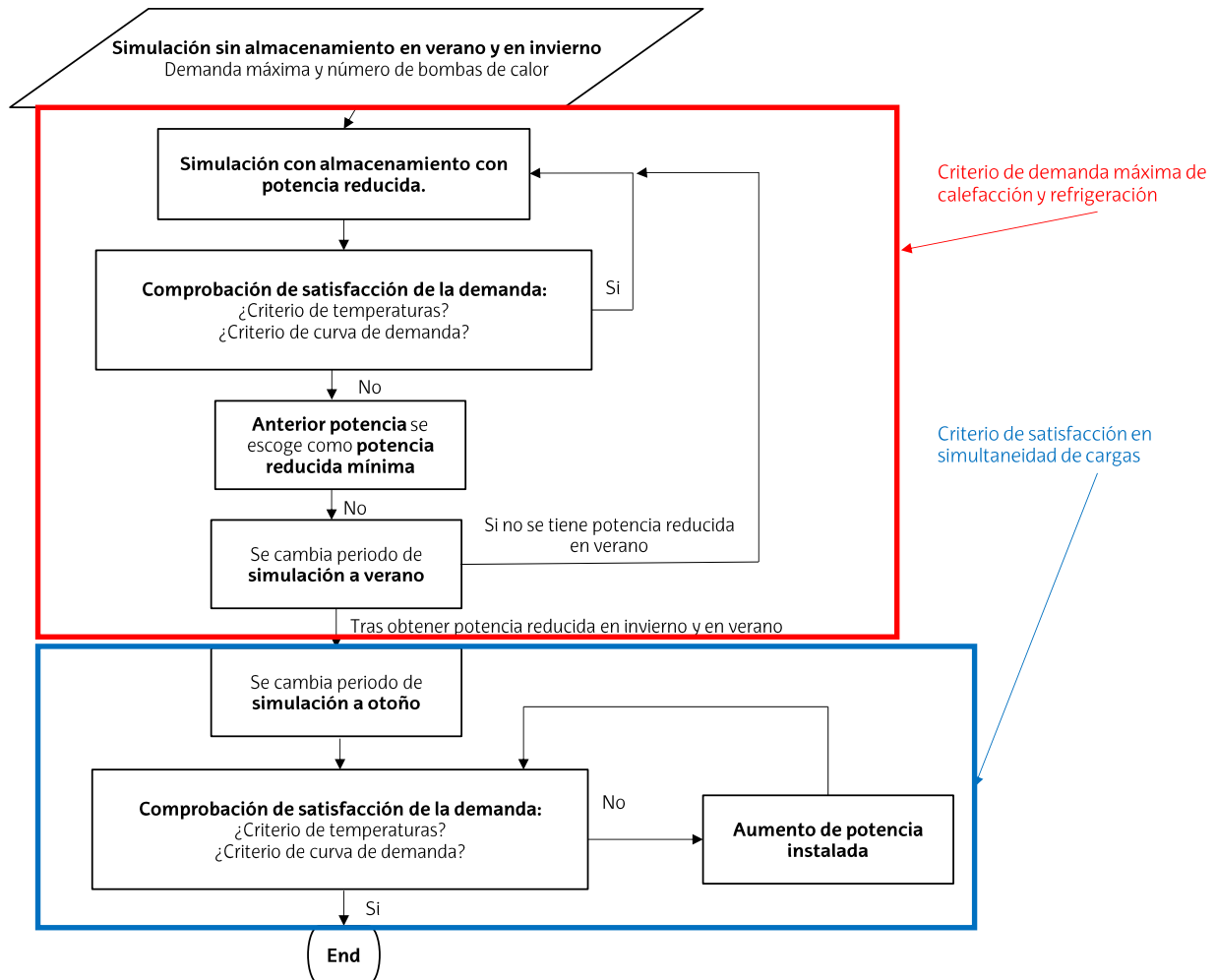
Se comenzará por exponer el algoritmo de trabajo para el dimensionamiento tanto de calefacción como de refrigeración. Se ha expuesto previamente cual es el modelo del sistema HVACR usado y solo queda como incógnita el número de bombas de calor de calefacción y de refrigeración a usar, es decir, la potencia instalada de bombas de calor.

Uno de los objetivos de este trabajo es comprobar si se cumple en esta instalación la hipótesis de que se puede usar un tanque para peak shaving y con ello reducir potencia instalada. Para poder comprobar esta hipótesis habrá que obtener la potencia mínima instalada de bombas de calor necesaria cuando no hay almacenamiento, y posteriormente realizar simulaciones con almacenamiento reduciendo la potencia instalada tanto como sea posible sin disminuir el confort térmico ni la satisfacción de la demanda.

Para este estudio el proceso fue el siguiente:

1. Se simula en semana de invierno el modelo sin almacenamiento y se encuentra cual es la demanda máxima (Que será la potencia máxima otorgada en un momento dado). También se verifica el número de bombas de calor encendidas en ese momento.
2. Se simula el modelo con almacenamiento con una potencia instalada menor a la máxima sin almacenamiento, reduciendo el número de bombas de calor instaladas. Se evalúa si se cumplen 2 criterios de satisfacción de demanda:
  - a. La variación de temperaturas entre las zonas de los modelos es baja o despreciable. (Percentil 90% con 0.5°C o menos de diferencia).
  - b. La diferencia entre la curva de satisfacción de demanda entre modelos es baja o despreciable. (Clara superposición de curvas).
3. Si se satisfacen ambos criterios se vuelve a reducir la potencia instalada y se repite hasta que no se cumplan, escogiendo la menor potencia que si satisface ambas condiciones como "potencia reducida".
4. Se repiten los pasos 1 a 3 en la simulación de semana de verano
5. Se simula la semana de otoño. El almacenamiento se sitúa en la calefacción. Con la potencia mínima del criterio de máxima demanda en invierno y en verano. Se aplican los mismos criterios que el paso 2. Si se cumplen se ha finalizado, si no se cumplen se aumenta el número de bombas de calor hasta satisfacer el periodo donde hay simultaneidad.

El diagrama de bloques del algoritmo de dimensionamiento de potencia reducida con almacenamiento se puede ver en la Figura 21.



**Figura 21: Diagrama de bloques de algoritmo para obtener la reducción de potencia mediante uso de almacenamiento**

Finalizado el dimensionamiento de potencia reducida se habrán obtenido 2 datos: la potencia mínima de HVACR para satisfacer la necesidad del sistema sin almacenamiento y la misma potencia pero usando almacenamiento. Posteriormente se verá que en número de bombas de calor esto son 4 bombas de calor sin almacenamiento y 3 bombas de calor con almacenamiento.

Previo a la explicación del control de consignas cabe mencionar que en instalaciones reales la potencia instalada no es la mínima necesaria, sino del orden del 1.2-1.25 veces la misma. Esto es por razones de seguridad en los cálculos, poder hacer mantenimiento, tener aparatos de reserva, etc. Siendo así y habiendo adelantado que el resultado del dimensionamiento son 4 bombas de calor sin almacenamiento y tan solo 3 con almacenamiento se decidió estudiar el control de consignas con 3 potencias diferentes 3,4 y 5 bombas de calor instaladas.

Este análisis de control de consignas con varias potencias instaladas reproducirá la tendencia real de instalaciones a estar sobredimensionadas. Además permitirá ver comportamientos que se den gracias al almacenamiento y/o a las consignas según vaya aumentando la potencia instalada.

Se van a estudiar por tanto un total de 9 tipos de simulación: 3, 4 y 5 bombas de calor como diferentes potencias instaladas y sin almacenamiento, con almacenamiento y con almacenamiento + control de consignas como tipos de modelos.



Antes de explicar que criterio seguirá el control de consignas se explicará en que consiste. El funcionamiento del control de consigna en este estudio juega con 2 consignas:

- Disponibilidad de bombas de calor
- Temperaturas de consigna del aljibe

El control de consignas varía, en función de distintos intereses, la cantidad de bombas de calor que pueden operar a una hora concreta, así como la temperatura a la que el aljibe se considera cargado o descargado.

El control de consigna que se va a aplicar depende de dos factores.

### **Control de consignas por exceso de fotovoltaica**

Existe precedente en el estado del arte donde se ha estudiado el uso de un tanque de almacenamiento como batería térmica para aprovechar el exceso de energía fotovoltaica. Esto es usar las consignas del sistema para que trabaje a máxima potencia cuando hay fotovoltaica sobrante y a mínima o desactivadas las bombas de calor cuando no hay fotovoltaica sobrante.

Este tipo de control es especialmente interesante en verano y en meses intermedios en días soleados. Como estrategias se han aplicado 2: ventana de funcionamiento y sobrecarga.

La ventana de funcionamiento consiste en no dejar operar a ninguna o al mínimo número de bombas de calor cuando no hay exceso de fotovoltaica, por ejemplo: de 4 bombas instaladas, si no hay fotovoltaica sobrante, solo 1 puede funcionar en caso de que el aljibe se descargue.

La sobrecarga consiste en cambiar la temperatura donde el tanque se considera cargado a una más exigente, por ejemplo en verano si existe exceso de fotovoltaica las bombas de calor seguirán funcionando hasta que el tanque esté a 2°C en lugar de a 5°C.

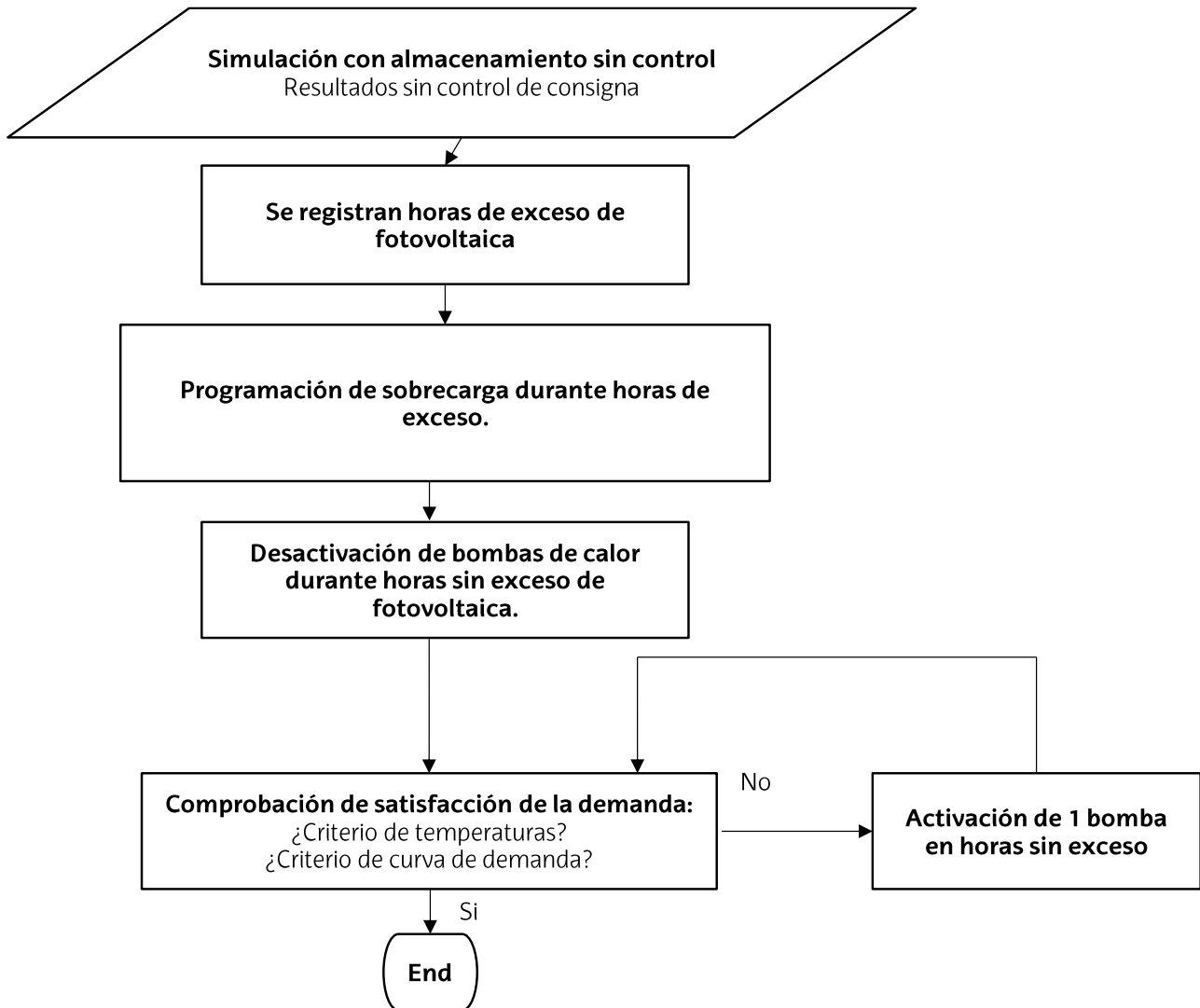
La combinación de ambas estrategias da como resultado que la curva de consumo eléctrico de HVAC se adecúa mejor a la curva de generación fotovoltaica, lo que aumenta la autosuficiencia y disminuye el consumo de energía de red.

Dicho control de consignas no se puede automatizar por defecto en Design Builder, por lo que se ha realizado de la siguiente forma

1. Se simula el periodo con almacenamiento y sin control de consignas
2. Si hay días de energía fotovoltaica sobrante se registran dichos días y las horas a las que hay exceso. Ejemplo: de 10:30 a 17:30 todos los días de verano o de 11:30 a 16:30 los días 13 y 14 de la simulación de otoño.
3. Se programa en Design Builder una consigna de sobrecarga (2°C en verano y 60°C en otoño donde el aljibe se usa en calefacción) y esta consigna de sobrecarga solo aplica durante las horas anteriormente marcadas
4. En el control de disponibilidad se desactivan fuera del periodo de exceso de fotovoltaica todas las bombas de calor y durante ese periodo se activan todas.
5. Se comprueba la demanda térmica. Si no satisface correctamente la demanda térmica, se activa una bomba más fuera de periodos de exceso y se repite el paso anterior.

6. Si se satisface la demanda, se considera el control de consignas para aprovechamiento fotovoltaico finalizado.

El diagrama de bloques de las simulaciones con control de consigna por exceso de fotovoltaica se puede ver en la Figura 22.



**Figura 22: Diagrama de bloques de simulaciones para control de consigna por exceso de fotovoltaica**

### **Control de consignas por precio de electricidad**

Otra forma de aprovechar la desvinculación entre producción y demanda que da el TES es intentando evitar consumir en periodos donde la electricidad es más cara y consumir más acumulándola cuando es más barata.

Este tipo de control de consignas es eficaz en épocas de baja radiación solar, todo el invierno y parte de días de otoño en este estudio.

El funcionamiento consiste en durante periodos muy baratos sobrecargar el tanque de almacenamiento con todas las bombas funcionando, y en periodos caros desactivar todas las

bombas de calor. Cuando el precio es intermedio funcionar el mínimo de bombas de calor necesarias.

Dicho control de consignas se ha de la siguiente forma:

1. Se simula el periodo con almacenamiento y sin control de consignas
2. Se sacan los precios de electricidad del año estudiado (2022) de datos del OMIE, año donde el precio medio fue de 204.50 €/MWh. De estos precios se dividen los periodos en 3 tipos imitando la distribución de precios por tramos para PVPC en España. Esta distribución se puede ver en la Figura 23. Se ha comprobado que estos periodos del PVPC imitados corresponden con los periodos de menor, medio y mayor precio de electricidad del OMIE.

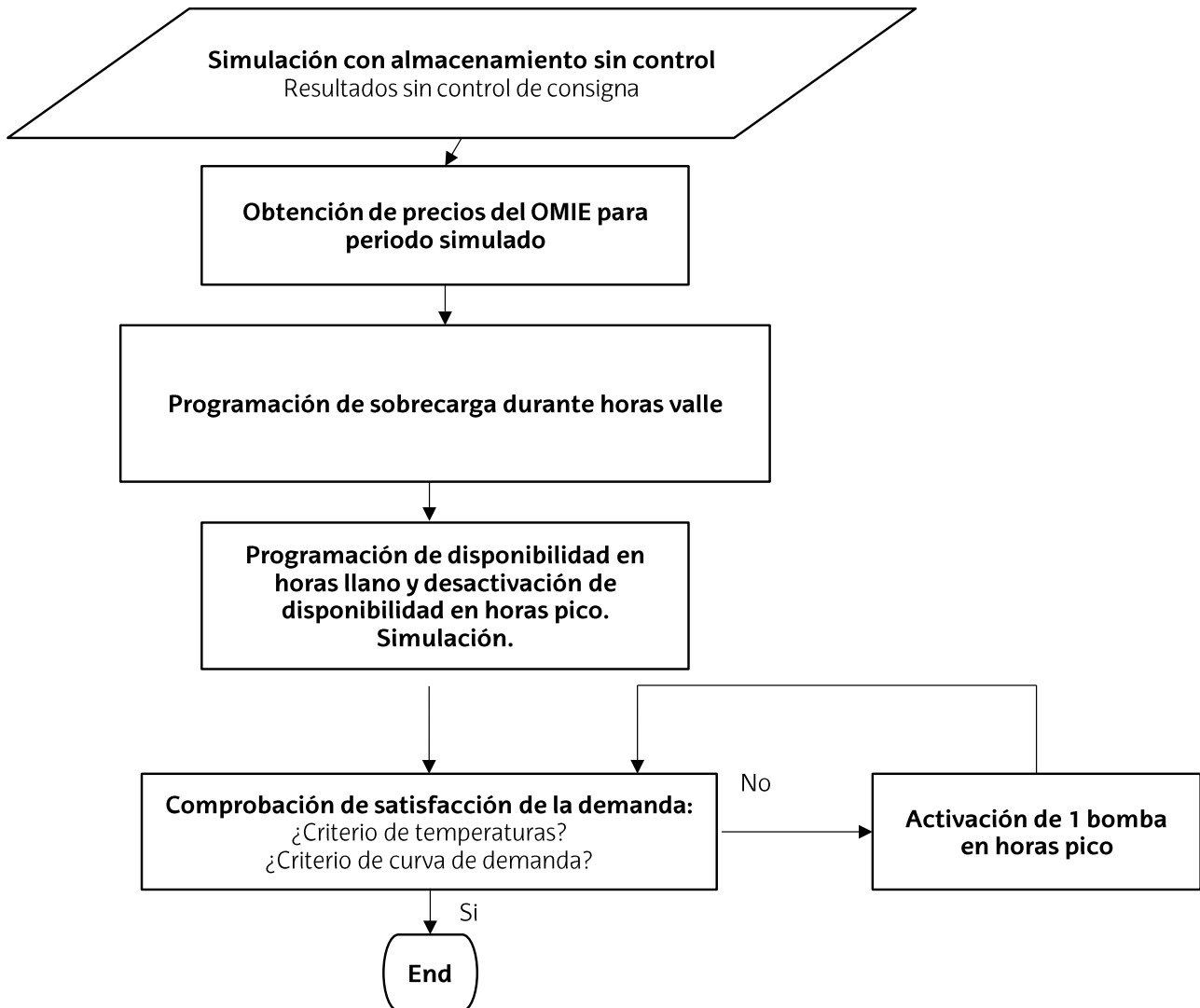
### Discriminación horaria Península, Baleares y Canarias

Punta	Llano	Valle
10:00 - 14:00	08:00 - 10:00	00:00 - 08:00
18:00 - 22:00	14:00 - 18:00	-
-	22:00 - 00:00	-

**Figura 23: Discriminación horaria de precios PVPC España**

3. Se programa en Design Builder una consigna de sobrecarga (60°C en otoño e invierno donde el aljibe se usa en calefacción) y esta consigna de sobrecarga solo aplica durante las horas llamadas “valle”.
4. En el control de disponibilidad se desactivan en los “picos” todas las bombas de calor, y en los periodos “valle” y “llano” se activan todas las bombas de calor.
5. Si no satisface correctamente la demanda térmica, se activa una bomba más en periodos pico y se repite la simulación.
6. Si se satisface la demanda se considera el control de consignas por precio de electricidad finalizado.

El diagrama de bloques de las simulaciones con control de consigna por coste de electricidad se puede ver en la Figura 24.



**Figura 24: Diagrama de bloques de simulaciones para control de consigna por coste de electricidad**

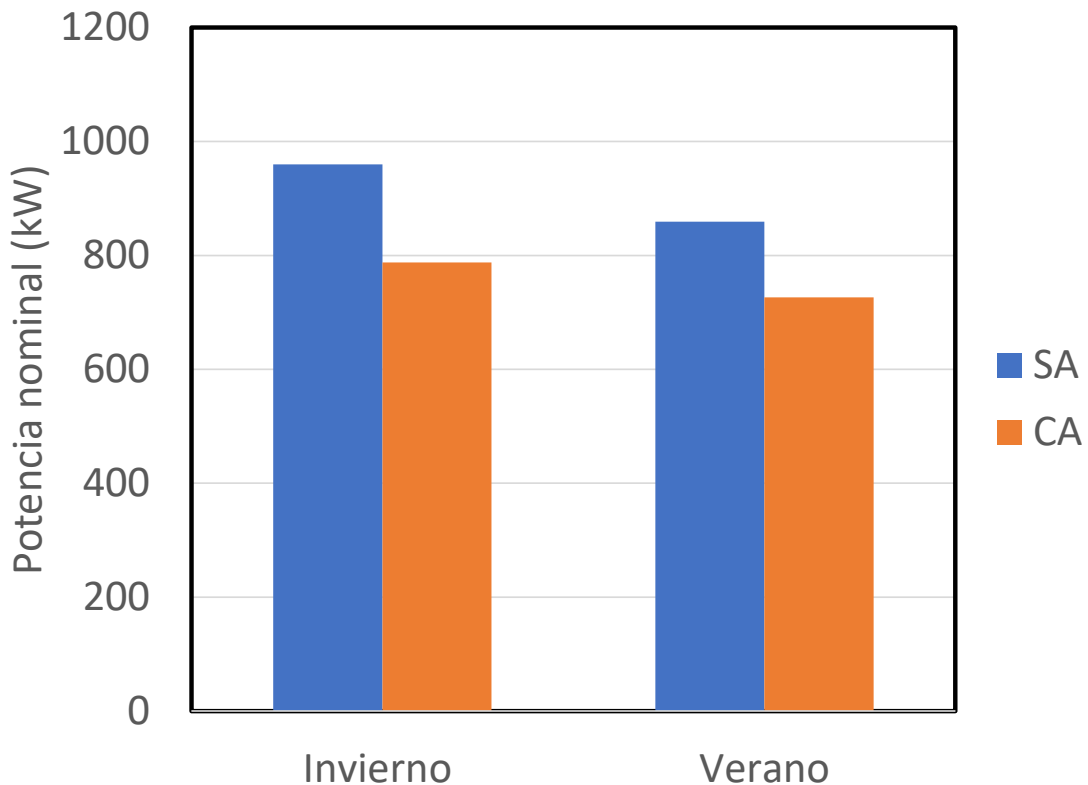
## 7. Análisis de los resultados

### 7.1. Reducción de potencia de bombas de calor mediante uso del aljibe como tanque de acumulación.

En primer lugar se mostrarán los resultados de la reducción de potencia instalada gracias al uso del aljibe como tanque de almacenamiento térmico. Como se ha explicado anteriormente, se ha calculado y simulado la potencia nominal (la potencia máxima necesaria) de bombas de calor en las 2 estaciones extremas del año en un modelo sin usar almacenamiento. Posteriormente se ha simulado otro modelo donde se ha añadido un tanque de almacenamiento con el volumen útil disponible en el aljibe y se ha reducido la potencia nominal instalada de bombas de calor tanto como se ha podido sin salir de las consignas de diseño ni alterar la satisfacción de la demanda por parte del sistema de HVACR.

Los resultados de potencia nominal necesaria en cada caso se ven en la Figura 25. Se puede ver en la misma que tanto en verano como en invierno la potencia nominal instalada de bombas de calor es menor al usar almacenamiento, en concreto las potencias nominales necesarias son:

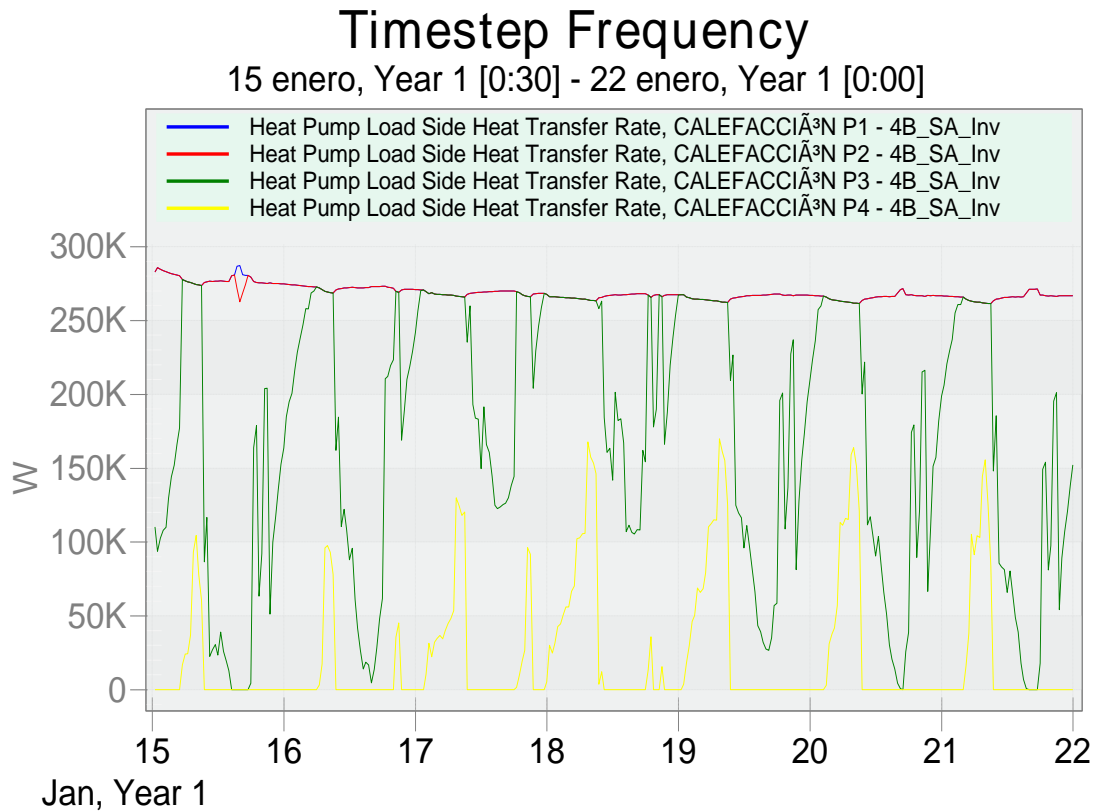
- En invierno: 960kW sin almacenamiento y 788kW con almacenamiento, una reducción del 18%
- En verano: 859kW sin almacenamiento y 726kW con almacenamiento, una reducción del 15%.



**Figura 25: Comparativa de potencia nominal instalada sin almacenamiento y con almacenamiento.**

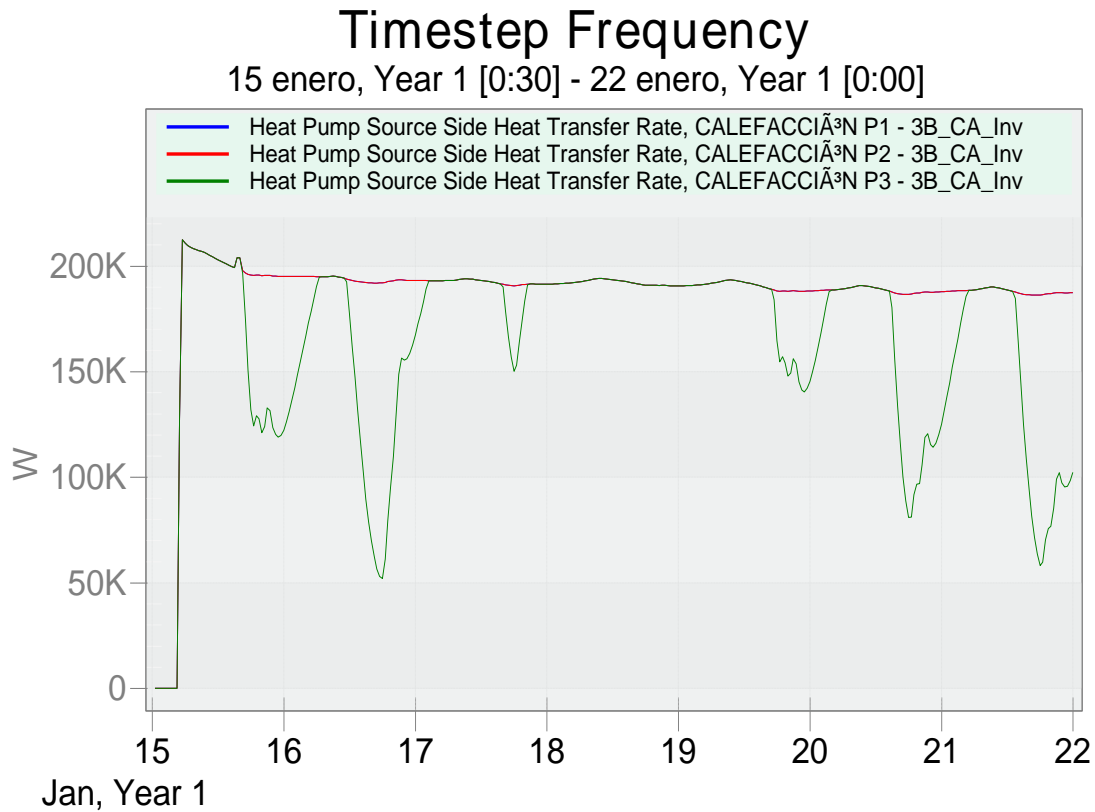
Para entender porque se ha podido dar esta reducción de potencia instalada se explicará la curva de potencia de las bombas de calor durante las semanas de estudio, estas curvas se ven de la Figura 26 a la Figura 29.

Poniendo atención en las curvas de invierno y sin almacenamiento se puede apreciar como 2 de las 4 bombas de calor usadas funcionan las 24 horas del día todos los días, esto es razonable ya que la demanda de calefacción es tanto diurna como nocturna. Las otras 2 bombas de calor funcionan siguiendo la carga y aumentando su potencia en los picos, de forma que la 3ª bomba de calor funciona en régimen de carga parcial y en picos llega a su régimen nominal y la 4ª y última bomba de calor en cambio se usa solo para esos picos a primera hora de la mañana.



**Figura 26: Curvas de potencia de bombas de calor sin almacenamiento en semana de invierno**

En cambio si se analiza el caso de invierno con acumulación se observa que mientras las bombas 1 y 2 funcionan igual que en el caso sin almacenamiento la 3ª bomba funciona más horas a régimen de potencia nominal. Esto es lo que permite eliminar la 4ª bomba de calor. Ahora, la potencia que antes daba la 4ª bomba a primera hora de la mañana se obtiene de descargar el tanque, y fuera de esas horas de alto consumo térmico la suma de las otras bombas de calor se encarga de cargarlo.



**Figura 27: Curvas de potencia de bombas de calor con almacenamiento en semana de invierno**

El caso del análisis en verano sin almacenamiento es similar al de invierno pero con la diferencia principal de que durante la noche no se encienden las bombas de calor la mayoría de los días, esto ocurre porque la carga de refrigeración sigue al sol. Los picos de consumo se dan a las 17:00-18:00 de la tarde, horas donde el sol ha estado calentando el edificio todo el día y aun no se ha puesto. En esos picos funcionan las 4 bombas de calor instaladas, las bombas 3 y 4 usándose tan solo para esos picos.



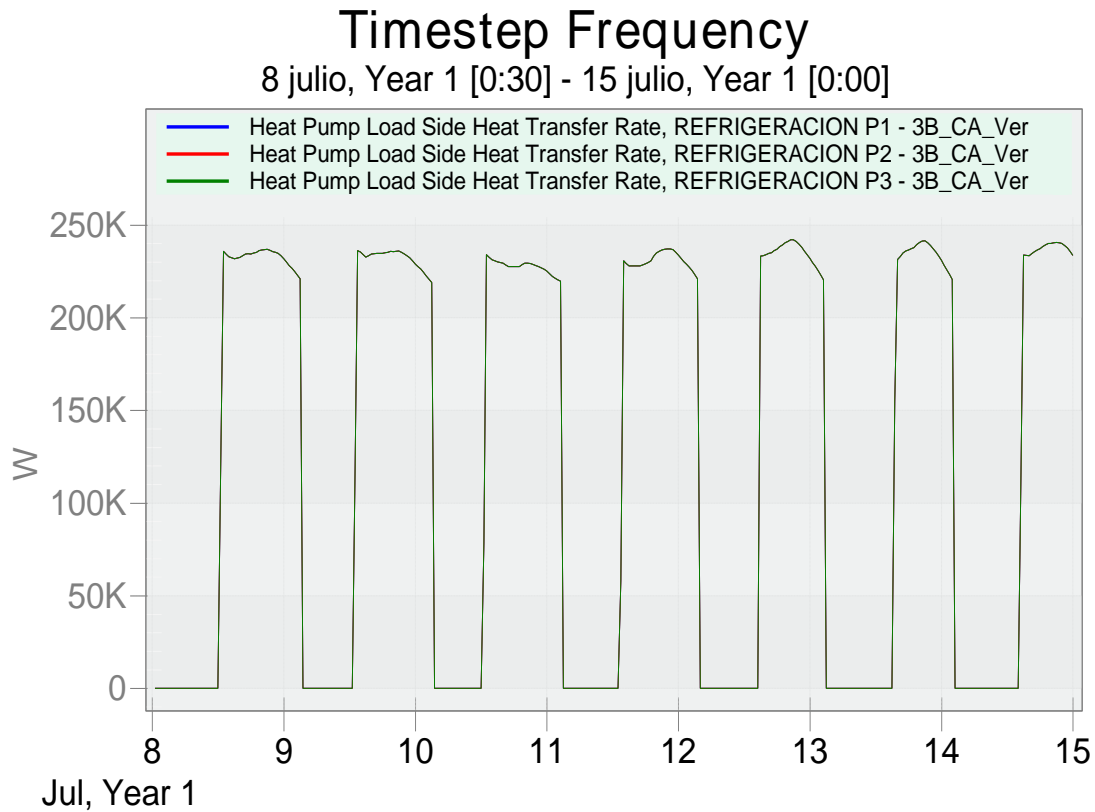
## Timestep Frequency

8 julio, Year 1 [0:30] - 15 julio, Year 1 [0:00]



**Figura 28: Curvas de potencia de bombas de calor sin almacenamiento en semana de verano**

Con almacenamiento y en verano se aprecia de nuevo el beneficio del uso del aljibe como tanque de acumulación. Todas las bombas funcionan o a potencia nominal o apagadas y el número de horas de funcionamiento aumenta, especialmente la 3ª bomba, que aumenta mucho sus horas de funcionamiento. De esta forma en horas de alta demanda de refrigeración el tanque se descarga y posteriormente se carga el tanque de nuevo.



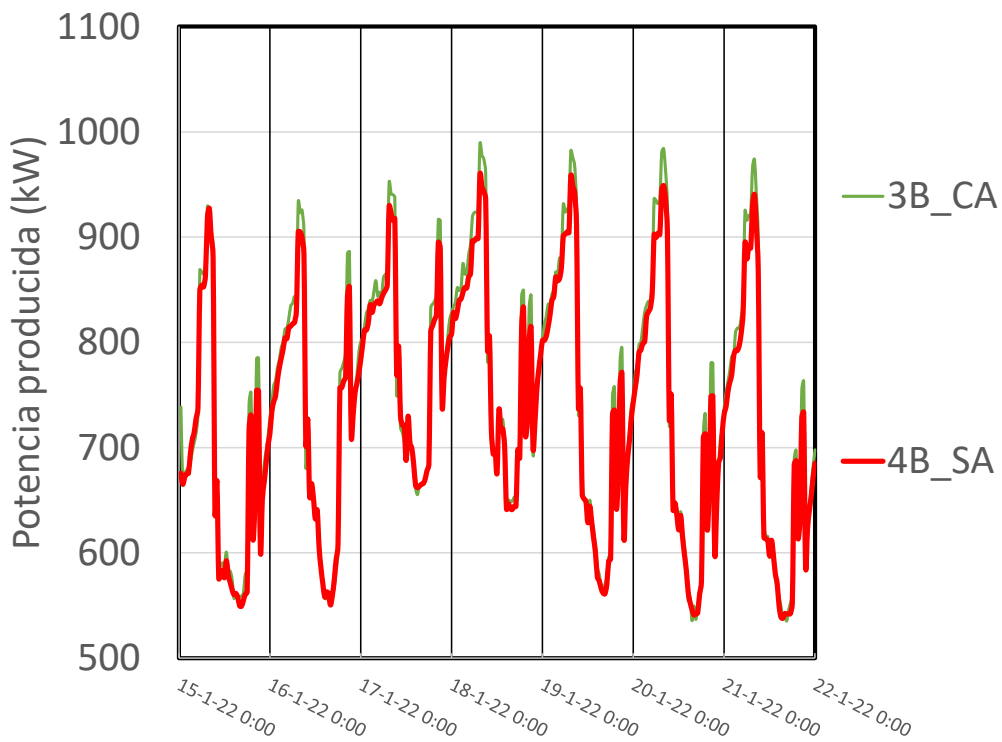
**Figura 29: Curvas de potencia de bombas de calor con almacenamiento en semana de verano**

Antes de sacar conclusiones sobre estos resultados se debe comprobar que la demanda térmica del edificio es satisfecha correctamente por el HVACR con almacenamiento. Para ello se han estudiado 2 resultados: la curva de potencia producida por el sistema de HVACR y las temperaturas de las diferentes zonas del edificio. Se presentarán ambos en los anexos “ANEXO III: Validación de curvas de potencia producida y demanda satisfecha de los modelos estudiados.” y en el “ANEXO IV: Validación de temperaturas por zona.”.

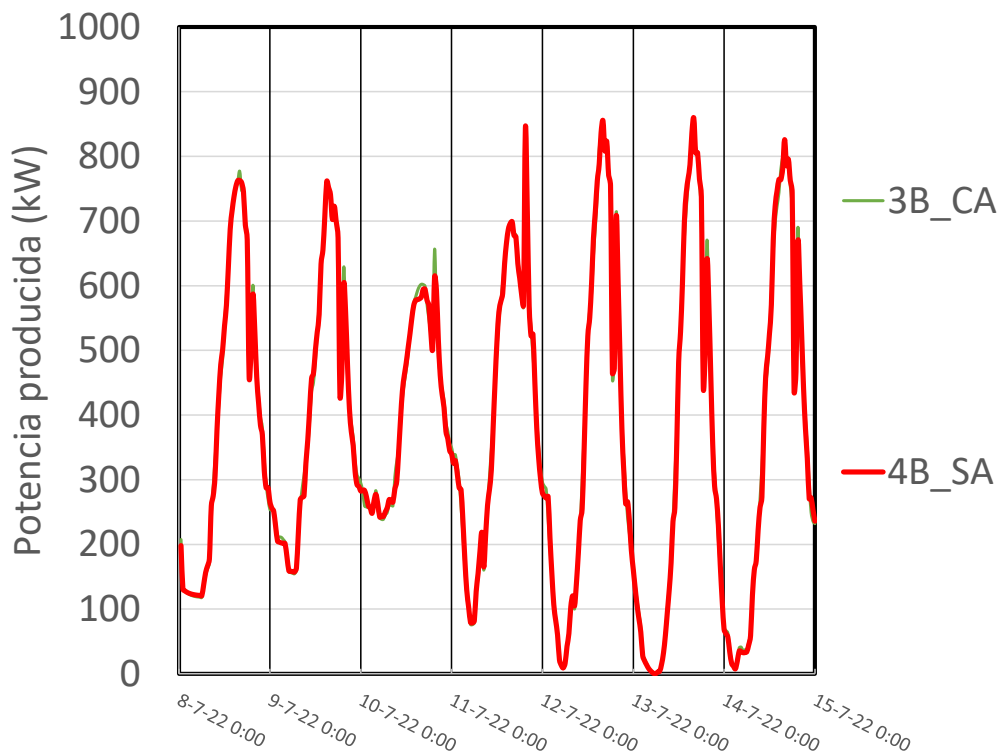
De estos anexos se recoge aquí parte de la comprobación de curva de potencia producida para ver la potencia que aporta el TES.

A continuación se muestran las curvas de potencia térmica producida por el sistema y llevada al circuito de demanda en invierno y en verano. Esto se ve en la Figura 30 y Figura 31.

Se aprecia en ambas figuras como tanto en verano como en invierno la potencia que va a demanda del sistema HVACR sin almacenamiento y con almacenamiento es prácticamente idéntica.



**Figura 30: Curvas de potencia otorgada en semana de invierno de sistemas con almacenamiento con 3 bombas de calor y sin almacenamiento con 4 bombas de calor.**



**Figura 31: Curvas de potencia otorgada en semana de verano de sistemas con almacenamiento con 3 bombas de calor y sin almacenamiento con 4 bombas de calor.**

Al ser satisfactorias las dos validaciones realizadas que se encuentran en los anexos correspondientes, se considerará como validada la operación correcta del sistema de HVACR con almacenamiento.

Estos resultados siguen las hipótesis planteadas en este trabajo y comprobadas en otros sectores en trabajos previos: un tanque de almacenamiento permite que las bombas de calor trabajen más horas de forma que aquellas “últimas” bombas que funcionaban pocas horas y se usaban para cubrir picos de potencia ahora se pueden eliminar y usar el propio almacenamiento para hacer peak shaving.

Los beneficios de la instalación de este uso del aljibe como tanque de almacenamiento son dos:

- Reducción de potencia instalada de bombas de calor
- Regulación de operación de las bombas (Menor número de encendidos, apagados y cargas parciales) y aumento de horas de uso de algunas de las bombas de calor.

## **7.2. Uso de consignas de ahorro: Comparativa para diferente potencia instalada.**

Los resultados previos han mostrado cómo se puede lograr una reducción de potencia instalada en bombas de calor gracias a descargar el tanque a modo de peak shaving. Pero es habitual y se considera una buena práctica un sobredimensionamiento de alrededor del 20-25% por razones varias referentes a otros apartados de la operación: introducir un coeficiente de seguridad en el dimensionamiento, tener bombas de calor disponibles si una falla o necesita mantenimiento, etc.

Esto abre la puerta a formas de usar el tanque de almacenamiento no solo para instalar menos potencia de bombas de calor, sino también para aprovechar la potencia extra instalada por razones ajenas al dimensionamiento de cargas.

Para esto se han simulado modelos con 3, 4 y 5 bombas de calor con almacenamiento en una semana de verano, invierno y otoño. Además se ha distinguido entre usar algún tipo de control de consigna de ahorro o dejar que el sistema funcione con solo consignas de temperatura del tanque. La descripción de dichas consignas se ha explicado previamente en el apartado de Dimensionamiento y operación de HVACR. Análisis estacional y control de consignas..

De la Tabla 1 a la Tabla 3 se recogen los resultados obtenidos: consumo total, consumo de red y coste económico. Posteriormente, dichos resultados se separarán en grupos para analizarlos. La nomenclatura indica: número de bombas de calor para la simulación (3, 4 o 5 bombas de calor), el modelo analizado (SA: Sin almacenamiento, CA: Con almacenamiento sin control de consignas, CC: Con almacenamiento con control de consignas), la semana de estudio indicada por letras: I (Invierno), V (Verano), O (Otoño).



	SA			CA			CC		
	I	V	O	I	V	O	I	V	O
<b>3B</b>	NA	NA	NA	72932	51542	53847	NA	NA	NA
<b>4B</b>	I	V	O	I	V	O	I	V	O
	68808	51135	52193	74276	52841	53019	73557	53466	53825
<b>5B</b>	I	V	O	I	V	O	I	V	O
	68808	51135	52193	74940	53428	53754	74684	54106	53076

Tabla 1: Consumo total en semana de estudio(kWh)

	SA			CA			CC		
	I	V	O	I	V	O	I	V	O
<b>3B</b>	NA	NA	NA	60201	22060	35443	NA	NA	NA
<b>4B</b>	I	V	O	I	V	O	I	V	O
	56300	18964	36499	62343	21262	34427	61392	17670	34370
<b>5B</b>	I	V	O	I	V	O	I	V	O
	56300	18964	36499	63362	21235	37532	62533	17900	32524

Tabla 2: Consumo de red en semana de estudio (kWh)

	SA			CA			CC		
	I	V	O	I	V	O	I	V	O
<b>3B</b>	NA	NA	NA	12954	3509	5066	NA	NA	NA
<b>4B</b>	I	V	O	I	V	O	I	V	O
	12143	2986	5322	13418	3360	4912	13004	2741	4876
<b>5B</b>	I	V	O	I	V	O	I	V	O
	12143	2986	5322	13602	3300	5375	13173	2770	4658

Tabla 3: Gasto económico en semana de estudio (€)

### 7.3. Resultados que no varían y no existentes

En primer lugar se analizarán los resultados que son iguales entre sí y los no existentes.

- Sin almacenamiento, el mínimo son 4 bombas de calor de las usadas en el modelo, ya que con 3 no se satisface la demanda máxima. Por ello no existe valor de 3 bombas sin almacenamiento ya que no satisface la demanda.
- Sin almacenamiento con 4 y 5 bombas de calor la operación es exactamente igual ya que no se puede almacenar energía y la 5ª bomba de calor sencillamente sobra. Precisamente se analiza esta bomba de calor para los casos con almacenamiento donde se le puede dar un uso.
- Con almacenamiento y 3 bombas de calor el sistema está dimensionado de forma tan ajustada que no se pueden aplicar consignas, ya que no hay horas posibles donde se

puedan desactivar bombas o hacerlas trabajar a más potencia. Por ello no se obtuvieron estos resultados.

#### 7.4. Aumento de consumo total al usar almacenamiento. Disminución del COP por aumento de salto térmico.

Al analizar los resultados de bombas 4 bombas de calor se puede ver como el consumo total aumenta con almacenamiento y más aun con control de consignas. Esto se puede ver en la Figura 32.

La causa de este aumento de consumo es el aumento del salto térmico de las bombas de calor. Cuando no se usa almacenamiento las bombas de calor por ejemplo en invierno trabajan llevando el agua hasta los 45°C, pero con almacenamiento para poder cargar el tanque por encima de los 45°C las bombas de calor calientan el agua hasta incluso 50°C.

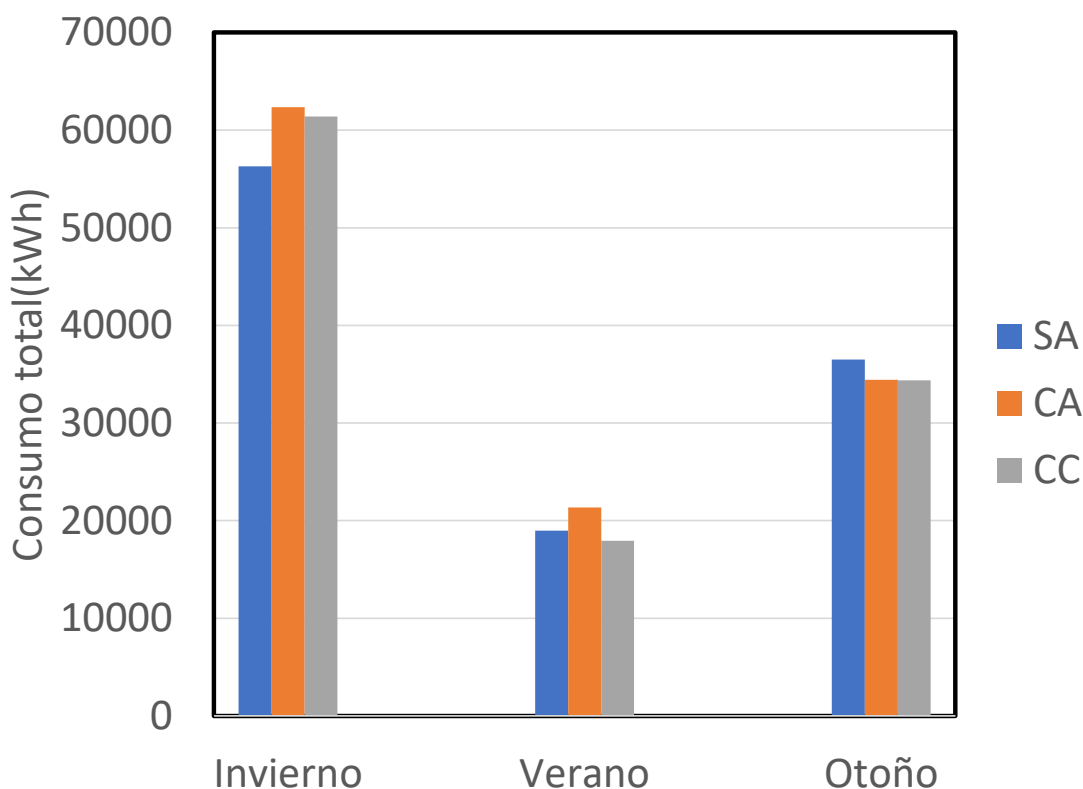


Figura 32: Consumo total con 4 bombas instaladas para las diferentes configuraciones.

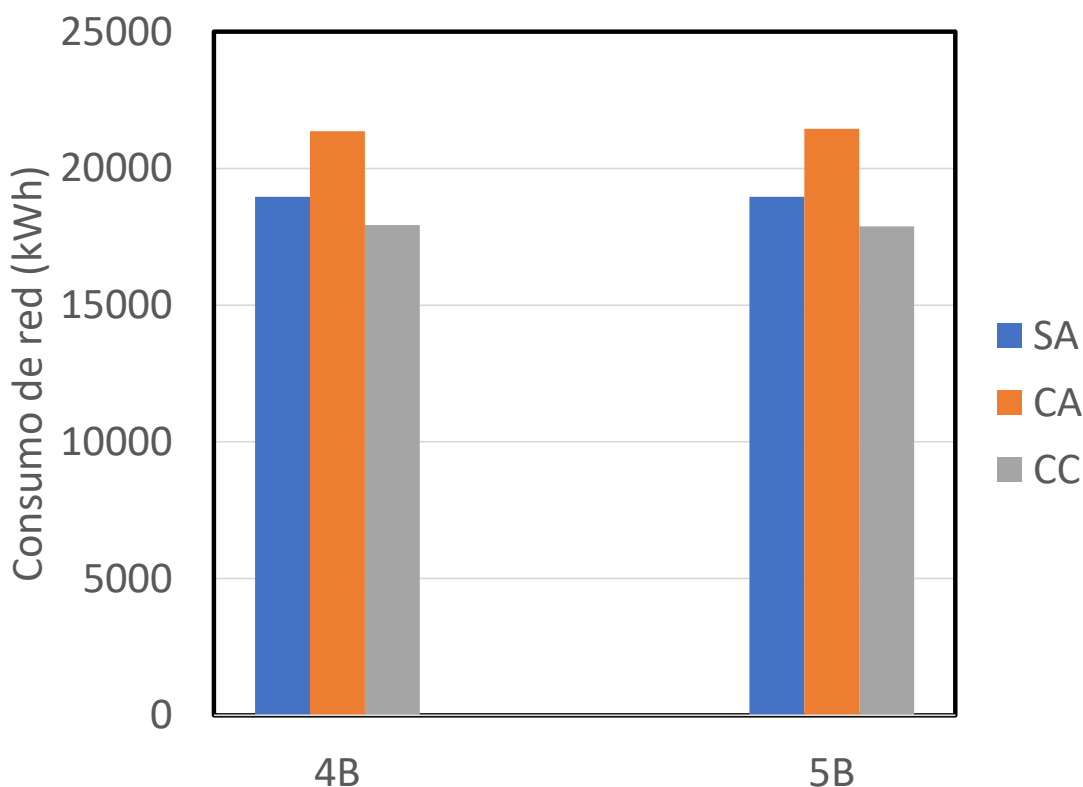
Esta diferencia de salto térmico provoca que para la misma potencia térmica el consumo eléctrico sea mayor ya que el COP disminuye y esta será una desventaja clara que el sistema con almacenamiento deberá compensar con el uso de control de consignas para lograr un ahorro.

## 7.5. Resultado de uso de estrategias de control de consignas en verano. Aprovechamiento fotovoltaico.

En verano el uso de control de consignas de ahorro tiene como objetivo concentrar el consumo de las bombas de calor en aquellas horas donde hay exceso de energía fotovoltaica. Así se ahorra energía de red y se aumenta la autosuficiencia del sistema usando el tanque a modo de batería térmica para la producción fotovoltaica.

El resultado de consumo de red en verano se encuentra en la Figura 33. En ella se observa que si no se usa control de consignas el consumo de red aumenta mucho. Esto es porque en verano la demanda térmica (en este caso, de refrigeración), sigue al sol y por tanto sigue a la producción fotovoltaica. Al añadir almacenamiento y no controlarlo esa relación empeora.

Al usar control de consignas el consumo de red es menor que sin almacenamiento, y por ende se produce un ahorro energético y económico. Este ahorro es del orden de un 7% del consumo de red. Además la instalación de una 5ª bomba no produce mayor ahorro energético, y la razón es una cuestión operativa: la temperatura de congelación. Las temperaturas son tan bajas que la potencia extra se ve limitada para evitar que se congele el agua. En el "ANEXO V: Resultados extra de ahorro en verano" se encuentran análisis más profundos de este fenómeno.



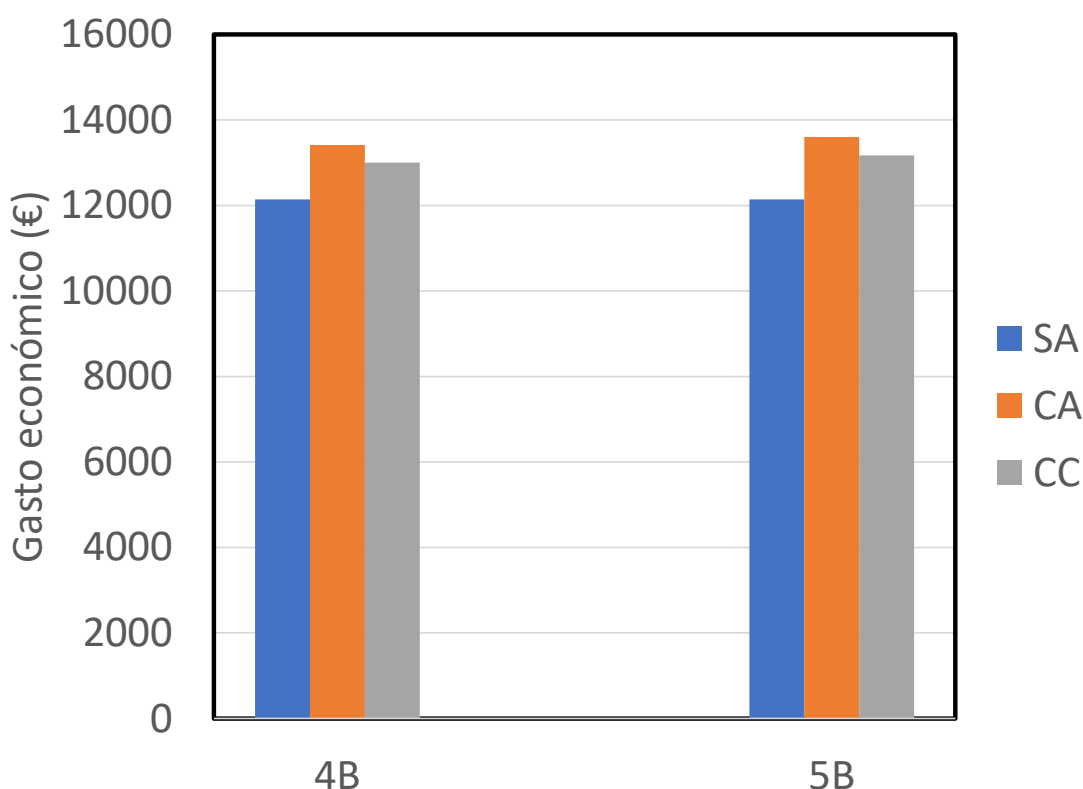
**Figura 33: Consumos de red en semana de verano**  
 Como conclusiones de los resultados de control de consignas de ahorro en verano:

- El uso de control de consignas en verano para un mayor aprovechamiento de la energía fotovoltaica no solo es beneficioso porque puede provocar un ahorro de energía de red, además es necesario porque su ausencia provoca un aumento del consumo de red.
- La instalación de mayor potencia de bombas de calor para refrigeración no causa un mayor ahorro ya que se ve limitada por la temperatura de congelación.

### 7.6. Resultado de uso de control consignas en invierno. Control según precio de electricidad.

Ya se ha explicado cómo en invierno la producción fotovoltaica no es suficiente para que exista energía sobrante para aprovechar, por ello el control de consignas se ha hecho en función de evitar los picos de alto precio de electricidad y sobrecargar en las horas más baratas. Los precios usados fueron los del año 2022 para todos los casos estudiados.

Analizando los resultados económicos de la Tabla 3, que se han graficado en la Figura 34, se puede ver que el uso de control de consignas de ahorro logra una reducción de costes de consumo respecto al modelo sin consignas pero sigue siendo un coste superior al modelo sin almacenamiento.

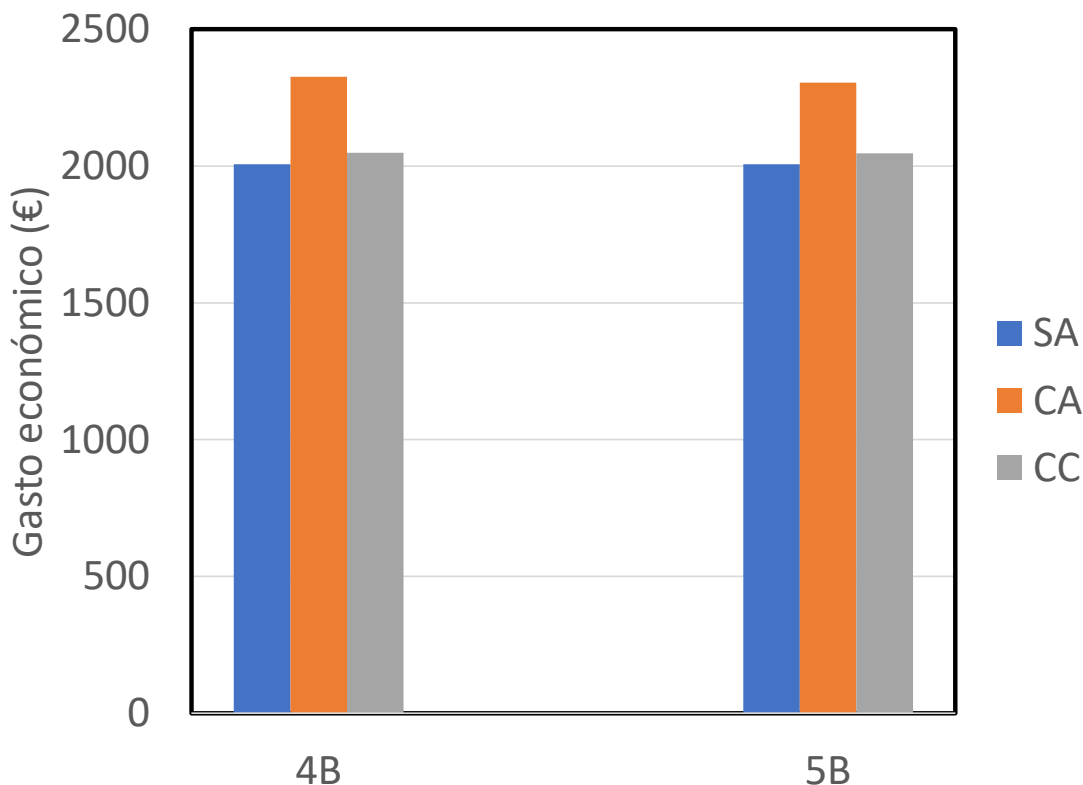


**Figura 34: Costes económicos de consumo en semana de invierno con precios de 2022.**

No obstante, también se ha realizado este mismo análisis con los precios de la electricidad del año 2023 y se han graficado en la Figura 35. Aparte de una abrumadora diferencia de costes de electricidad respecto a 2022, con estos nuevos precios el modelo con consignas de ahorro y el



modelo sin almacenamiento tienen costes de consumo que distan menos entre si. En concreto en 2022 el coste del consumo de es un 8.5% más caro con consignas y almacenamiento que sin almacenamiento y en 2023 este sería tan solo un 2% más caro.



**Figura 35: Costes económicos de consumo en semana de invierno con precios de 2023.**

Como conclusiones de este apartado de uso de control de consignas en invierno:

- El uso de control de consignas de ahorro en función del precio de la electricidad siempre provoca ahorro económico respecto a no usar estas consignas, haciéndolo recomendable o incluso necesario.
- El ahorro económico de consumir en horas más baratas y evitar las más caras no compensa el coste del consumo extra por la disminución del COP, pero según la curva de precios cada año el resultado tiene una varianza notable. Una curva de electricidad con valles muy bajos y picos muy altos podría llegar a provocar ahorro en lugar de sobrecoste.
- La instalación de una 5ª bomba de calor no logra un ahorro económico mayor ya que lo que se ahorra por consumir electricidad más barata se pierde al aumentar el consumo total por un mayor salto de temperatura. De nuevo esta relación podría cambiar con una variación de la curva de precios de electricidad.

### **7.7. Resultado de uso de control consignas en otoño. Consignas mixtas.**

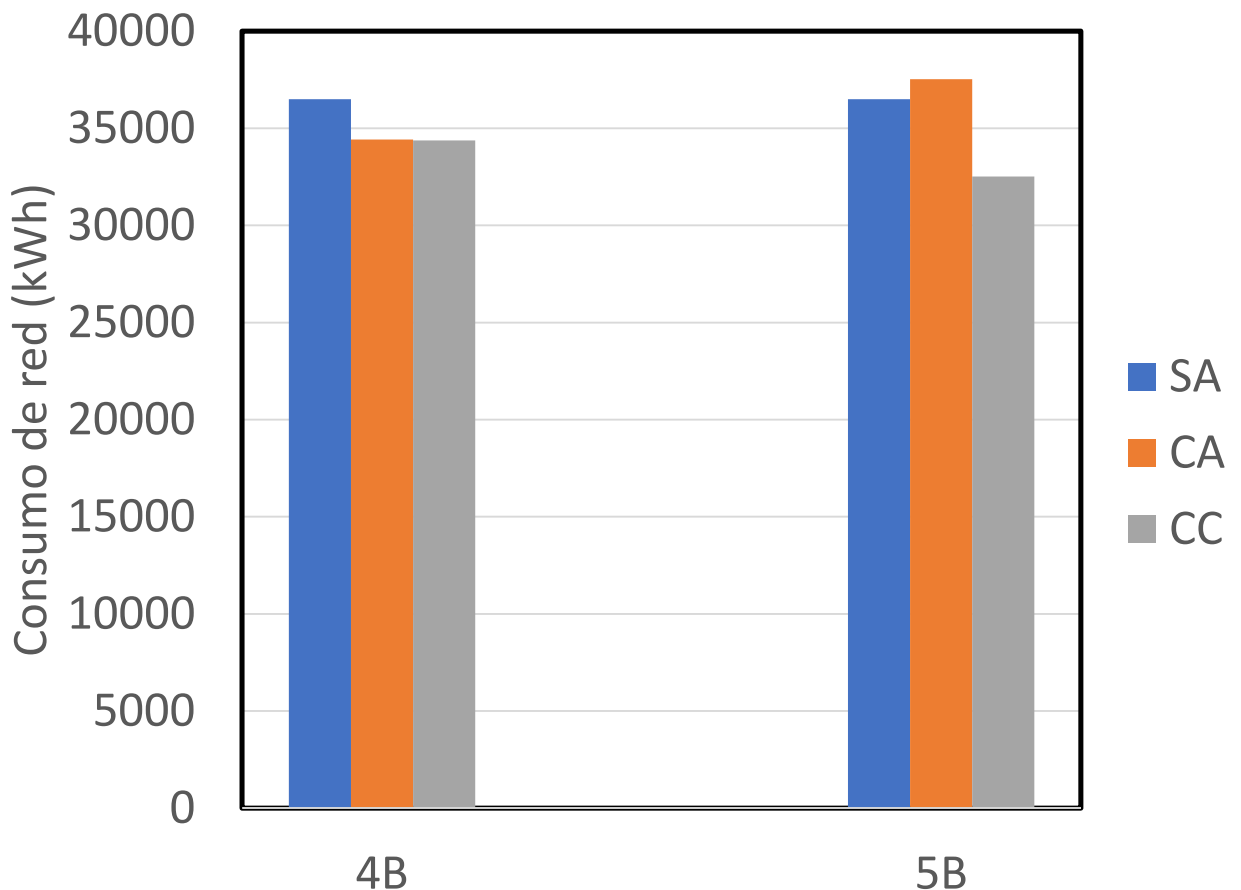
Tras estudiar las posibilidades de ahorro mediante el uso de control de consignas en las semanas de diseño (verano e invierno, donde las demandas son máximas) se ha estudiado una semana de

Octubre para analizar qué ocurre en meses donde la demanda es menor y además puede ser mixta de calefacción y refrigeración. Ya que la demanda es principalmente de calefacción el tanque de acumulación se usa para calefacción.

En la semana estudiada hay electricidad sobrante de fotovoltaica algunos días, pero no en todos. Esto es adecuado ya que refleja la realidad de menor número de días de sol en meses fuera de verano. Por ello, se han aplicado las dos consignas que previamente se han estudiado: Si hay energía fotovoltaica sobrante se ha sobrecargado el tanque durante horas de sol, si no hay energía fotovoltaica sobrante entonces se han evitado las horas de alto coste de electricidad y sobrecargado en las horas más baratas.

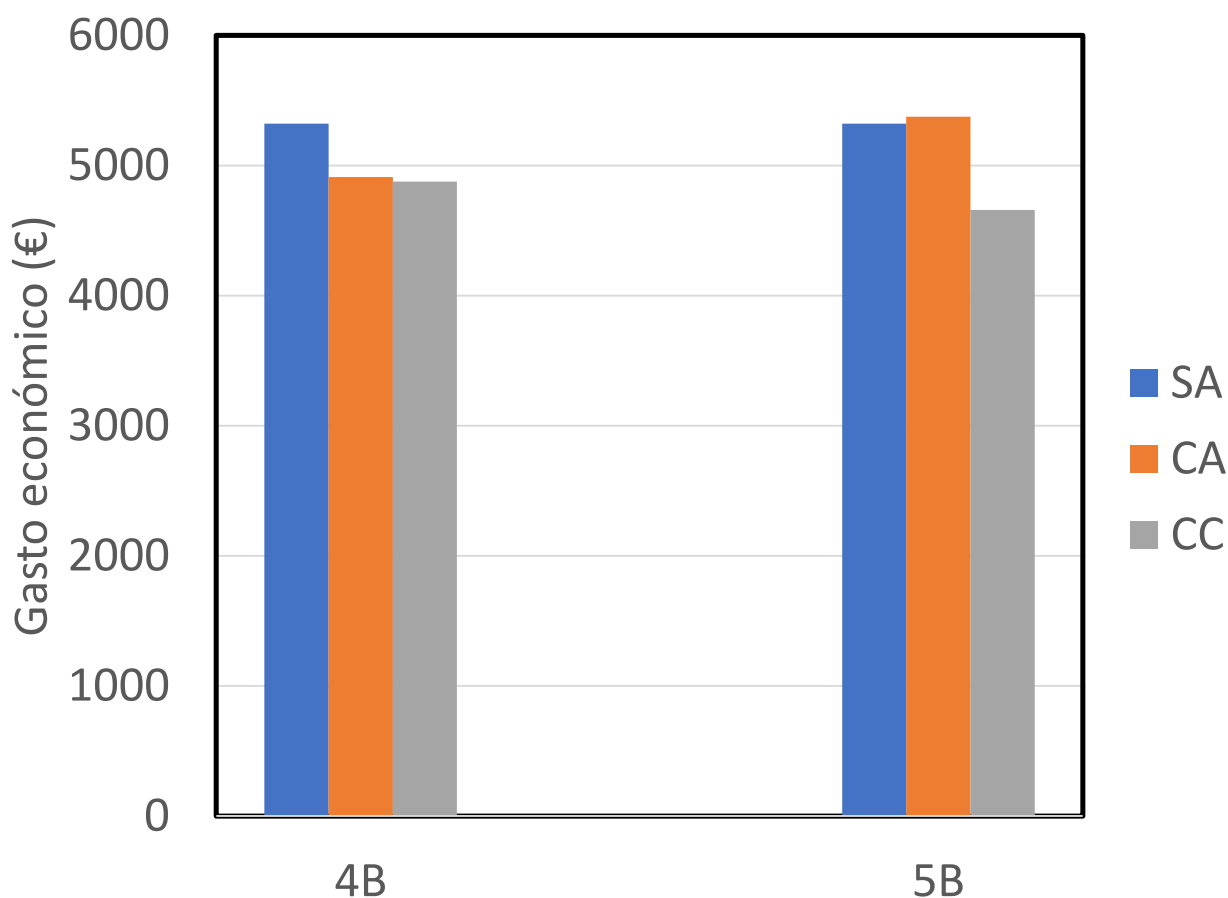
Por tanto habrá que analizar tanto los resultados de consumo de red como los de coste económico del consumo y esto se ha hecho en la Figura 36 y la Figura 37.

Analizando el consumo de red, se puede ver cómo se logra un ahorro energético con control de consignas que aumenta según la potencia instalada. Esto es porque en otoño la principal demanda es calefacción, cuyos picos se dan a primera hora de la mañana y a última de la tarde, y el uso de almacenamiento con consigna mueve estos picos de consumo a horas de fotovoltaica los días que hay energía sobrante, de forma que el potencial de ahorro es alto, de hasta un 10.9% de la energía consumida de red al usar 5 bombas de calor.



**Figura 36: : Consumos de red en semana de otoño**

En cuanto al coste económico la tendencia es la misma que el ahorro de energía de red pero incluso mejor cuando se aplica control de consignas. Esto es porque no solo se reduce el coste por ahorrar consumo de red sino que además el control por precio de electricidad hace que los días donde no existe fotovoltaica sobrante, la electricidad que se consume es de horas más baratas. Por esto, el ahorro de costes económicos del consumo que se puede dar al usar consignas es hasta del 12.5% con 5 bombas de calor, mayor que el ahorro de energía de red.



**Figura 37: Costes económicos de consumo en semana de otoño**

Como conclusiones de estos resultados control de consignas de otoño:

- El control de consignas más adecuado es aquel que tiene en cuenta tanto el mayor aprovechamiento fotovoltaico como el precio de la electricidad, ya que no todos los días hay sobrante de fotovoltaica. De nuevo no usar estrategias de control de consignas causa un aumento del consumo de red y del coste de electricidad, afianzando la necesidad de usar estrategias de control de consignas.
- El ahorro que se puede dar al usar almacenamiento con control de consignas es del orden del 10% de energía de red y 12.5% de coste de electricidad, un potencial muy alto gracias a que son meses de alta demanda de calefacción la cual no sigue al sol de forma natural.

- A diferencia de verano e invierno la instalación de una 5ª bomba de calor sí ha derivado en un mayor ahorro, ya que el aprovechamiento fotovoltaico no se ve ahora limitado por la temperatura de congelación al tratarse de almacenar para calefacción.

## 8. Conclusiones y líneas futuras

El objetivo principal de este trabajo de investigación era extender los resultados de otras investigaciones de almacenamiento térmico con bombas de calor y fotovoltaica que se han estudiado principalmente en el sector residencial al caso real de la renovación del complejo Iwer y su aljibe.

Se han simulado diferentes configuraciones del complejo Iwer en Design Builder para una potencial instalación de HVACR con bombas de calor y fotovoltaica en cubierta. Algunas de estas configuraciones incluyen almacenamiento térmico para simular un uso del aljibe del edificio.

Se ha encontrado que la reducción de potencia de bombas instaladas mediante el uso del aljibe como TES para peak shaving ronda el 18% en calefacción y el 15% en refrigeración. Esto está en línea con resultados de estudios anteriores donde la refrigeración era un factor clave en el tamaño necesario del tanque y siendo esta reducción de potencia del mismo orden que trabajos previos. Este resultado se ha validado comprobando que la demanda térmica se sigue satisfaciendo correctamente.

En segundo lugar se han aplicado y modificado las estrategias de control de consignas que en otros estudios lograron un ahorro energético y/o económico, siendo estas aprovechar la energía fotovoltaica sobrante y evitar las horas de alto precio de electricidad promoviendo el consumo en las más baratas. Para este análisis se ha estudiado una semana en verano, invierno y otoño en un año climático concreto (2022) con los siguientes resultados.

Se ha encontrado que al aumentar el salto térmico de las bombas de calor para poder cargar el aljibe como tanque de acumulación, el COP de las mismas ha disminuido, lo que provoca un aumento en el consumo eléctrico total del sistema. Esto se verá contrarrestado por alguna de las tácticas de ahorro.

Además se ha apreciado que, en todos los casos analizados, el uso de control de consignas da un menor consumo o coste de electricidad. Esto indica que el uso de acumulación térmica debe ir siempre de la mano del control de consignas para no causar perjuicios en el consumo.

Respecto a resultados según la estación estudiada, la acumulación en verano, donde se acumula agua fría para refrigeración y se aprovecha la fotovoltaica en exceso, ha mostrado potencial de ahorro de un 5% del consumo de red con relación a la opción sin almacenamiento. Este ahorro no puede aumentarse mediante más potencia debido a la temperatura de congelación: Las tácticas de control requieren de poder sobrecargar el aljibe, pero al funcionar tan cerca de la temperatura de congelación el sistema en ocasiones ve limitada su potencia de producción en sobrecarga por la necesidad de evitar la congelación del agua.

La acumulación en invierno tiene como conclusión principal que el uso de acumulación encarece o puede acercarse a ahorrar según el coste de electricidad de red. Un análisis con los precios de 2022 muestra un encarecimiento, pero en 2023 habría casi provocado un ahorro variando un 6% el coste de electricidad entre la semana de 2022 y de 2023. Esto marca una gran sensibilidad respecto a estos precios, sus valles y sus picos, para calcular el retorno de una inversión en almacenamiento. La acumulación en otoño es la que muestra un mayor potencial de ahorro: 10% en energía de red y 12.5% en coste de energía, al comparar con el modelo sin almacenamiento usando 5 bombas de calor. En primer lugar la acumulación en otoño tiene más potencial de ahorro usando fotovoltaica que en verano ya que en verano se almacena refrigeración, cuya curva sigue a la curva de radiación solar, mientras que en otoño se acumula para calefacción, curva con máximos fuera de horas de sol. Adaptar la curva de calefacción a la producción de energía fotovoltaica es una técnica con alto potencial de ahorro energético. A su vez, se ha aplicado el control de consignas en función de precios los días donde no hay exceso de fotovoltaica con resultados positivos en ahorro de costes. Como conclusión, estos resultados muestran un potencial uso del aljibe como almacén térmico que merece seguir siendo explorado al ahorrar en potencia instalada, estabilizar la operación de las bombas de calor y poder lograr ahorro energético y económico en el consumo.

Estas conclusiones son la que marcan el camino a trabajos futuros. Con acceso a ordenadores de mayor potencia y más simulaciones se podría ahondar en la envolvente térmica, tanto en análisis paramétricos de diferentes envolventes térmicas según los materiales a usar en la renovación energética como en técnicas computacionalmente pesadas como el control de sombras en los huecos.

Respecto al sistema de HVACR diseñado se ha elegido un sistema central, pero falta por evaluar si otros sistemas de HVACR que sigan esquemas diferentes también podrían aprovecharse del aljibe como tanque de acumulación. De la misma forma el uso de máquinas reales con datos de fabricante en lugar de las presentes en Design Builder podría acercarse a la realidad del proyecto estudios como este. Asimismo un análisis de las posibles pérdidas térmicas a través de las paredes del aljibe es necesario para introducirlas en el modelo.

Extender este estudio a un estudio tecno-económico donde se haga un análisis de la inversión y el retorno, así como de un ahorro energético a largo plazo, requeriría de solo un estudio de la inversión inicial en la rehabilitación del aljibe y en como se haría la instalación (bombas de calor de aire o de agua, longitud extra de tuberías al ir al subterráneo, etc.). También sería necesario un análisis de simulación de varios años en lugar de tan solo tres semanas para así obtener con mayor precisión el posible ahorro energético y económico y tratar de extenderlo al futuro.

Finalmente, en caso de la ejecución de la idea expuesta en este trabajo en el complejo Iwer, un estudio empírico de la operación del aljibe para compararla con la operación simulada sería necesario para encontrar posibles anomalías.

## 9. Planificación del trabajo

### 9.1. Descripción de tareas, fases, equipos o procedimientos

Las tareas realizadas son:

1. Revisión del estado del arte de posibles usos del aljibe.
2. Estudio del software a usar (Design Builder) y su adecuación para la investigación a realizar (que posea modelos de lo que queremos simular). Finalización con modelo muy simplificado para tan solo el ala de la residencia.
3. Realización del modelo de envolvente térmica y perfiles de actividad: Cálculo de la demanda.
4. Diseño y dimensionado del HVACR sin almacenamiento, con almacenamiento y con almacenamiento más control de consignas.
5. Obtención de resultados estacionales y pasar los datos a Excel para su análisis.
6. Análisis de los resultados.
7. Realización de gráficas de resultados.
8. Escritura de la memoria, revisión y entrega de la misma.

### 9.2. Diagrama de Gantt:

- Del 24/10/2022 al 15/12/2022: Revisión del estado del arte y simultanea comprobación de adecuación del software para realizar el estudio.
- Del 15/12/2022 al 30/01/2023: Primer análisis preliminar en un ala del edificio, se comprueban las posibles ventajas del uso del aljibe de forma preliminar.
- Del 30/01/2023 al 07/06/2023: Realización del modelo, dimensionado de HVACR. Obtención de resultados y análisis de resultados. Realización de gráficas de resultados.
- Del 08/05/2023 al 03/07/2023: Realización de la memoria. Borrador esquemático, 1er borrador completo.
- Del 03/07/2023 al 14/07/2023: Revisiones de la memoria y versión final. Entrega de la memoria.

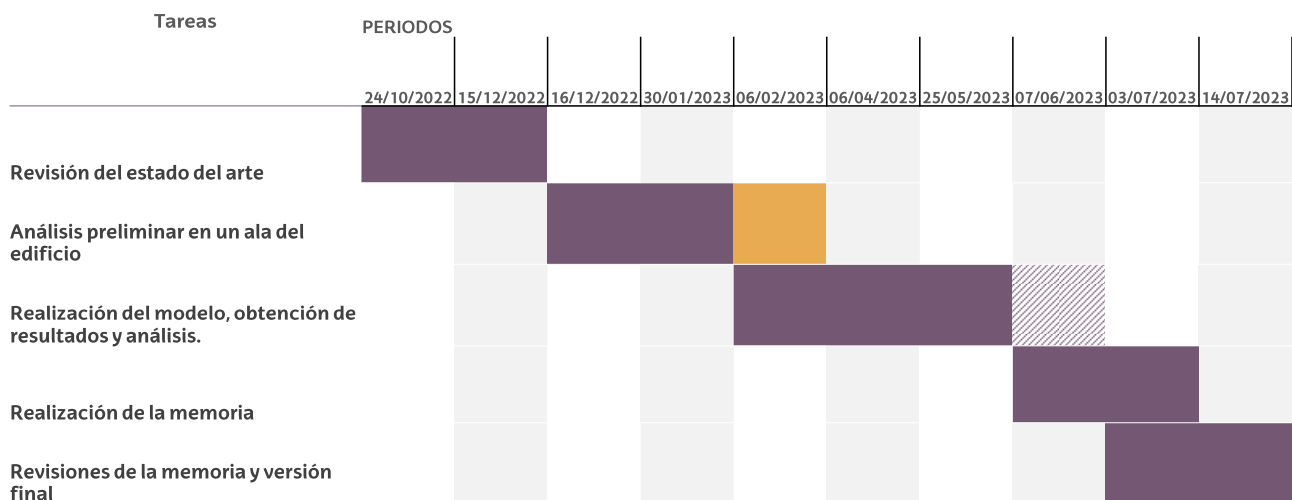


Figura 38: Diagrama de Gantt de tareas del trabajo

## 10. Descargo de gastos

En este apartado se recogen los costes asumidos por el desarrollo de este trabajo.

### 10.1. Horas internas

Las horas internas recogen el tiempo dedicado por los participantes al proyecto. El coste unitario de las horas es de 50€/h para el director y 7€/h para el alumno.

HORAS INTERNAS	HORAS (H)	COSTE UNITARIO (€/H)	COSTE TOTAL (€)
DIRECTOR TFM	50	50	2500,00
ALUMNO	400	7	2800,00
<b>TOTAL</b>			<b>5300,00</b>

Tabla 4: Desglose de horas internas

### 10.2. Amortizaciones

Las amortizaciones corresponden a activos adquiridos para la realización del trabajo. El más destacable para este trabajo es la licencia de Design Builder usada y la pérdida de valor del ordenador personal usado debida a su uso.

AMORTIZACIONES	COSTE (€)	VIDA (AÑOS)	HORAS ÚTIL USO (H)	DE COSTE TOTAL (€)
ORDENADOR	900	8	300	50
LICENCIA DESIGN BUILDER	100	1	190	100
<b>TOTAL</b>				<b>150</b>

Tabla 5: Desglose amortizaciones

### 10.3. Resumen del descargo de gastos

Los ítems más costosos fueron las horas internas usadas para el trabajo, y el total del descargo de gastos asciende a 5450,00€.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Annunziata, M. Frey, F. Rizzi, Towards nearly zero-energy buildings: The state-of-art of national regulations in Europe, *Energy*. 57 (2013) 125–133. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2012.11.049>.
- [2] In focus: Energy efficiency in buildings | Comisión Europea, (n.d.). [https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-lut-17\\_es](https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-lut-17_es) (accessed November 26, 2022).
- [3] A. Blumberga, E. Cilinskis, A. Gravelins, A. Svarckopfa, D. Blumberga, Analysis of regulatory instruments promoting building energy efficiency, *Energy Procedia*. 147 (2018) 258–267. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2018.07.090>.
- [4] Residencial, comercial e institucional, (n.d.). <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/edificacion.aspx> (accessed June 12, 2023).
- [5] S. Tsemekidi Tzeiranaki, P. Bertoldi, M. Economidou, E.L. Clementi, M. Gonzalez-Torres, Determinants of energy consumption in the tertiary sector: Evidence at European level, *Energy Reports*. 9 (2023) 5125–5143. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2023.03.122>.
- [6] A. Chadly, R. Rajeevkumar Urs, M. Wei, M. Maalouf, A. Mayyas, Techno-economic assessment of energy storage systems in green buildings while considering demand uncertainty, *Energy Build*. 291 (2023) 113130. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2023.113130>.
- [7] A. Rinaldi, S. Yilmaz, M.K. Patel, D. Parra, What adds more flexibility? An energy system analysis of storage, demand-side response, heating electrification, and distribution reinforcement, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 167 (2022) 112696. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112696>.
- [8] Y. Li, G. Rosengarten, C. Stanley, A. Mojiri, Electrification of residential heating, cooling and hot water: Load smoothing using onsite photovoltaics, heat pump and thermal batteries, *J Energy Storage*. 56 (2022) 105873. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2022.105873>.
- [9] E.A. Ragoowansi, S. Garimella, A. Goyal, Realistic utilization of emerging thermal energy recovery and storage technologies for buildings, *Cell Rep Phys Sci*. 4 (2023) 101393. <https://doi.org/10.1016/J.XCRP.2023.101393>.
- [10] E. Osterman, U. Stritih, Review on compression heat pump systems with thermal energy storage for heating and cooling of buildings, *J Energy Storage*. 39 (2021) 102569. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2021.102569>.
- [11] Objectives | oPEN Lab, (n.d.). <https://oPEN Lab-project.eu/about/objectives/> (accessed November 26, 2022).



- [12] M. Mohanraj, Y. Belyayev, S. Jayaraj, A. Kaltayev, Research and developments on solar assisted compression heat pump systems – A comprehensive review (Part-B: Applications), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 83 (2018) 124–155. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.08.086>.
- [13] Y. Hwang, J.K. Lee, Y.M. Jeong, K.M. Koo, D.H. Lee, I.K. Kim, S.W. Jin, S.H. Kim, Cooling performance of a vertical ground-coupled heat pump system installed in a school building, *Renew Energy*. 34 (2009) 578–582. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.05.042>.
- [14] B.J. Huang, J.P. Chyng, Integral-type solar-assisted heat pump water heater, *Renew Energy*. 16 (1999) 731–734. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00264-X](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00264-X).
- [15] M. Qu, X. Yan, H. Wang, Y. Hei, H. Liu, Z. Li, Energy, exergy, economic and environmental analysis of photovoltaic/thermal integrated water source heat pump water heater, *Renew Energy*. 194 (2022) 1084–1097. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.010>.
- [16] Y. Li, N. Zhang, Z. Ding, Investigation on the energy performance of using air-source heat pump to charge PCM storage tank, *J Energy Storage*. 28 (2020) 101270. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101270>.
- [17] H. Nam, C. Bai, J. Sim, A study on characteristics of thermal storage tank for varying thermal load in multi-use heat pump water heater, *Appl Therm Eng*. 66 (2014) 640–645. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2014.02.009>.
- [18] W. Lyu, Z. Wang, X. Li, G. Deng, Z. Xu, H. Li, Y. Yang, B. Zhan, M. Zhao, Influence of the water tank size and air source heat pump size on the energy saving potential of the energy storage heating system, *J Energy Storage*. 55 (2022) 105542. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105542>.
- [19] A. Sohani, C. Cornaro, M.H. Shahverdian, D. Moser, M. Pierro, A.G. Olabi, N. Karimi, S. Nižetić, L.K.B. Li, M.H. Doranehgard, Techno-economic evaluation of a hybrid photovoltaic system with hot/cold water storage for poly-generation in a residential building, *Appl Energy*. 331 (2023) 120391. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.120391>.
- [20] K.S. Lee, Chapter 2: Underground Thermal Energy Storage, *Green Energy and Technology*. 75 (2013) 15–26. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4273-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4273-7_2).
- [21] Almacenamiento Térmico Estacional en un edificio rehabilitado en Bilbao dentro del Proyecto EINSTEIN • ESEFICIENCIA, (n.d.). <https://www.eseficiencia.es/2017/12/04/almacenamiento-termico-estacional-edificio-rehabilitado-bilbao-proyecto-einstein> (accessed October 17, 2022).
- [22] Tecnalía desarrolla un sistema de almacenamiento estacional de calor • CONSTRUIBLE, (n.d.). <https://www.construible.es/2016/01/13/tecnalia-desarrollo-un-sistema-de-almacenamiento-estacional-de-calor> (accessed October 17, 2022).
- [23] A. Lyden, C.S. Brown, I. Kolo, G. Falcone, D. Friedrich, Seasonal thermal energy storage in smart energy systems: District-level applications and modelling approaches, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 167 (2022) 112760. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112760>.

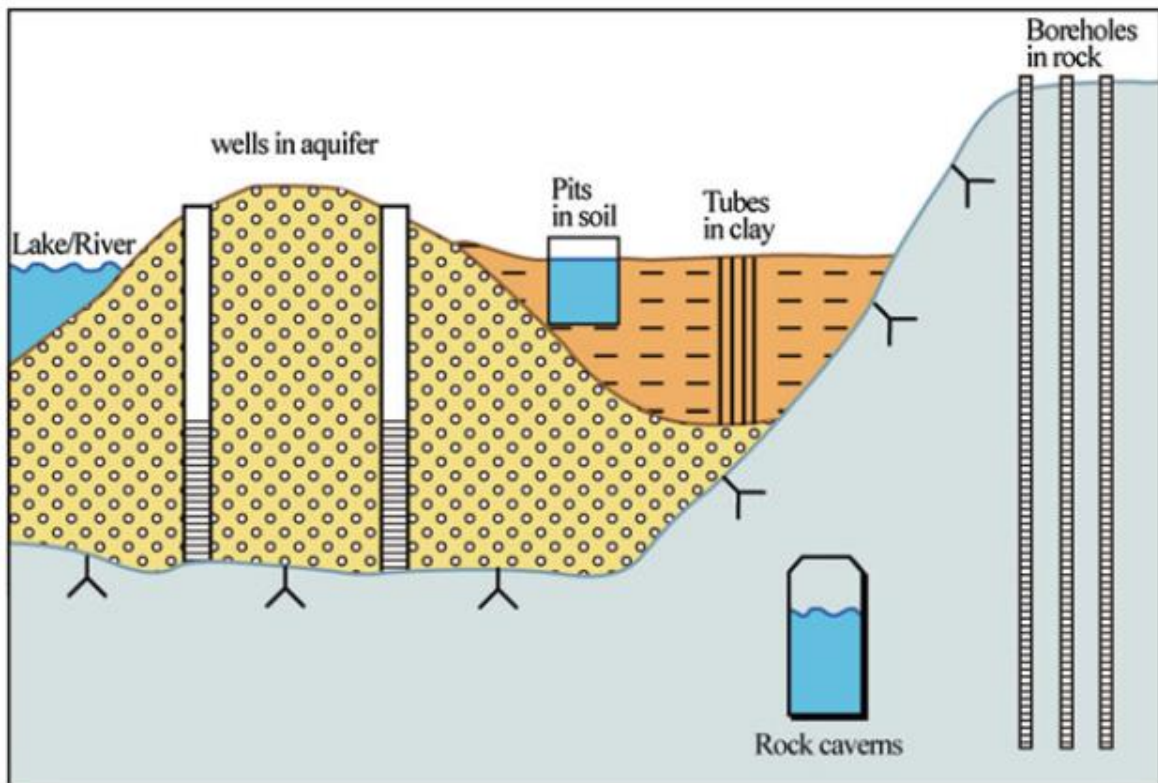
- [24] M. Dannemand, I. Sifnaios, Z. Tian, S. Furbo, Simulation and optimization of a hybrid unglazed solar photovoltaic-thermal collector and heat pump system with two storage tanks, *Energy Convers Manag.* 206 (2020) 112429. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.112429>.
- [25] A. Heinz, R. Rieberer, Energetic and economic analysis of a PV-assisted air-to-water heat pump system for renovated residential buildings with high-temperature heat emission system, *Appl Energy.* 293 (2021) 116953. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2021.116953>.
- [26] V. Palani, S.P. Vedavalli, V.P. Veeramani, S. Sridharan, Optimal operation of residential energy Hubs include Hybrid electric vehicle & Heat storage system by considering uncertainties of electricity price and renewable energy, *Energy.* 261 (2022) 124952. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2022.124952>.
- [27] J.-Y. Long, D.-S. Zhu, Numerical and experimental study on heat pump water heater with PCM for thermal storage, *Energy Build.* 40 (2008) 666–672. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.05.001>.
- [28] F. Agyenim, N. Hewitt, The development of a finned phase change material (PCM) storage system to take advantage of off-peak electricity tariff for improvement in cost of heat pump operation, *Energy Build.* 42 (2010) 1552–1560. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.027>.
- [29] N. Pardo Garcia, A. Montero, J. Martos, J. Urchueguia, Optimization of hybrid – ground coupled and air source – heat pump systems in combination with thermal storage, *Appl Therm Eng.* 30 (2010) 1073–1077. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.01.015>.
- [30] M.J. Kim, B.M. Seo, J.M. Lee, J.M. Choi, K.H. Lee, Operational behavior characteristics and energy saving potential of vertical closed loop ground source heat pump system combined with storage tank in an office building, *Energy Build.* 179 (2018) 239–252. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.09.025>.
- [31] Módulo HVAC de DesignBuilder, (n.d.). <https://www.designbuilder-lat.com/caracteristicas/modulo-hvac> (accessed May 30, 2023).
- [32] M. y A.U. Ministerio de Transportes, Documento Básico HE Ahorro de energía, n.d. <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf> (accessed May 31, 2023).
- [33] M. y A.U. Ministerio de Transportes, CTE: Código técnico de edificación. Guía de aplicación DB-HE, n.d. [moz-extension://6055a4ef-0866-4573-89cf-ab3564e7859c/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fwww.codigotecnico.org%2Fpdf%2FGuiasyOtros%2FGuia\\_aplicacion\\_DBHE2019.pdf](https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf) (accessed May 31, 2023).
- [34] ANNEXE Méthode de calcul Th-BCE 2012, n.d. <https://ingenierie.senova.fr/telechargements/Annexe-arrete-methode-de-calcul-TH-B-C-E-2012-CSTB.pdf> (accessed May 31, 2023).
- [35] M.Y.A.U. MINISTERIO DE TRANSPORTES, Documento Básico Seguridad en caso de Incendio, (n.d.). <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SI/DccSI.pdf> (accessed May 31, 2023).

- [36] M.A. Al-Nimr, R.F. Al-Waked, O.I. Al-Zu'bi, Enhancing the performance of heat pumps by immersing the external unit in underground water storage tanks, *Journal of Building Engineering*. 40 (2021) 102732. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102732>.
- [37] W. Cai, F. Wang, S. Chen, C. Chen, Y. Zhang, O. Kolditz, H. Shao, Importance of long-term ground-loop temperature variation in performance optimization of Ground Source Heat Pump system, *Appl Therm Eng*. 204 (2022) 117945. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.117945>.

### **ANEXO I: Posible uso como disipador de calor.**

Otro posible uso para un aljibe que no sea de acumulación es como elemento disipador en el condensador de un sistema con bomba de calor de agua. Este tipo de sistemas tradicionalmente usa el mismo principio que la geotermia para establecer su condensador: el terreno varios metros bajo tierra se encuentra a una temperatura menor en verano y mayor en invierno que el aire exterior, con lo que si se usa un pozo subterráneo como intercambiador de calor con el exterior se disminuye la diferencia de temperatura del mismo y esto aumenta el rendimiento de la bomba de calor [20].

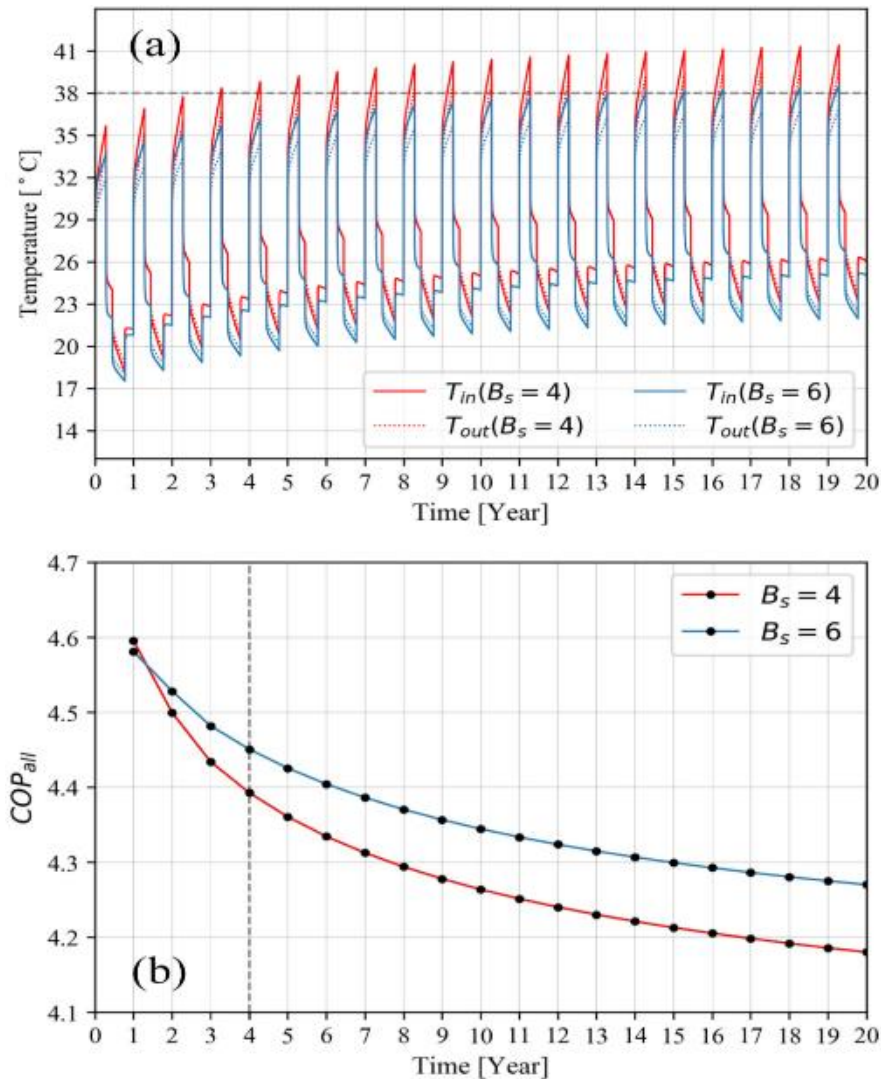
La limitación más importante de este tipo de sistemas con condensador subterráneo es el alto costo en inversión inicial por la obra y construcción de un pozo para intercambio de calor con el terreno, se pueden ver en la Figura 5 las tipologías de condensador subterráneo para sistemas de bombas de calor.



**Figura 39: Formas habituales de intercambiador de calor con el terreno [20]**

Existen precedentes en la literatura donde se analiza que de ya existir un tanque subterráneo, como es el caso en este estudio, existe la posibilidad de usarlo como condensador en un ciclo de bomba de calor de agua con menor inversión inicial y mejores resultados tanto energéticos como económicos a largo plazo [36].

La segunda problemática de estos sistemas es el sobrecalentamiento que se produce con los años. Si el elemento que se usa como condensador no evacúa calor con suficiente velocidad, se sobrecalentará, pero incluso si lo hace, se debe hacer un estudio del terreno cara a un análisis de varios años, ya que el terreno puede no tener la capacidad suficiente de evacuar el calor cedido por el condensador en su totalidad cada año, haciendo que sistemas que funcionan de forma adecuada los primeros años comiencen a tener temperaturas del terreno que derivan en problemas de funcionamiento [37].



**Figura 40: Temperaturas del condensador enterrado y COP del sistema proyectados a 20 años para un sistema de bomba de calor con condensador enterrado [37].**

Este uso se descartó en este trabajo tanto por la complejidad de un análisis del terreno a tan largo plazo como porque un primer estudio preliminar indicó un sobrecalentamiento del aljibe al usar un modelo de condensador de Design Builder que a grandes rasgos podría imitar al usado. En cualquier caso este posible uso se da como fuera del alcance de este trabajo pero se expone para indicar la consideración de los autores de otros usos para el aljibe.

## **ANEXO II: Diseño avanzado de HVACR.**

En este anexo se expone el diseño de circuitos de HVACR que han sido necesarios para el correcto funcionamiento de las simulaciones así como detalles extra sobre el sistema de producción.

### **Circuito de aire**

El circuito de aire, que se puede ver en la Figura 41, se ha realizado usando una plantilla de una UTA estándar en Design Builder. El funcionamiento simula dos ventiladores que introducen y extraen aire de las zonas en función de la ocupación y posee unas baterías de calor y frío para la modificación de la temperatura del aire usando agua de calefacción o refrigeración según sea

necesario. Todos los valores para el diseño son los predeterminados ya que simulan una UTA estándar. En cuanto a la cantidad de aire necesaria esta se autodimensiona en función de las necesidades del edificio.

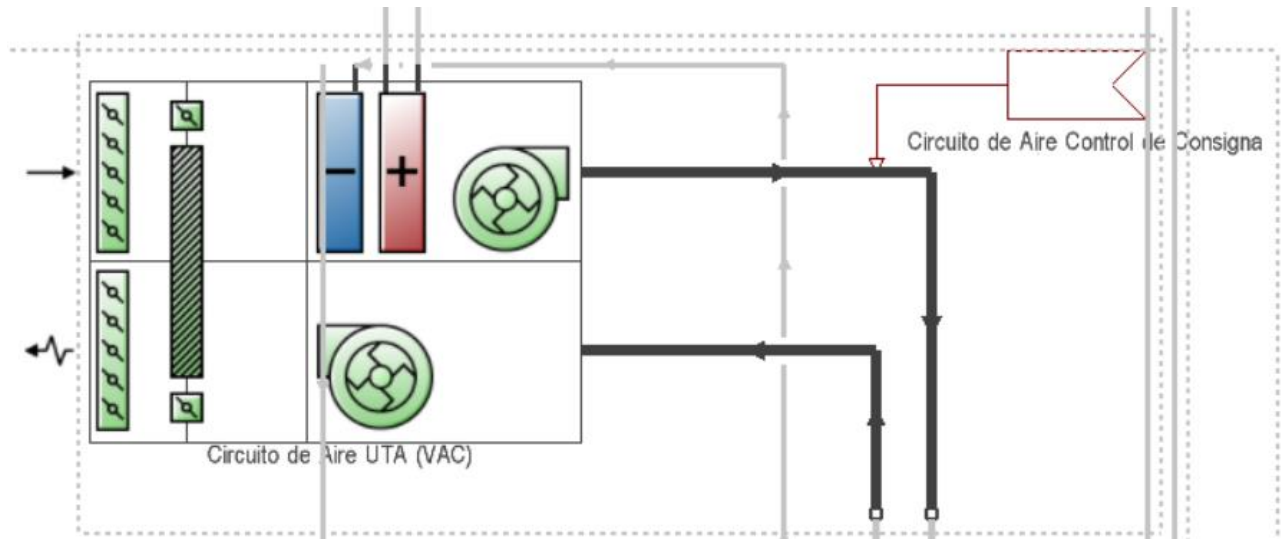
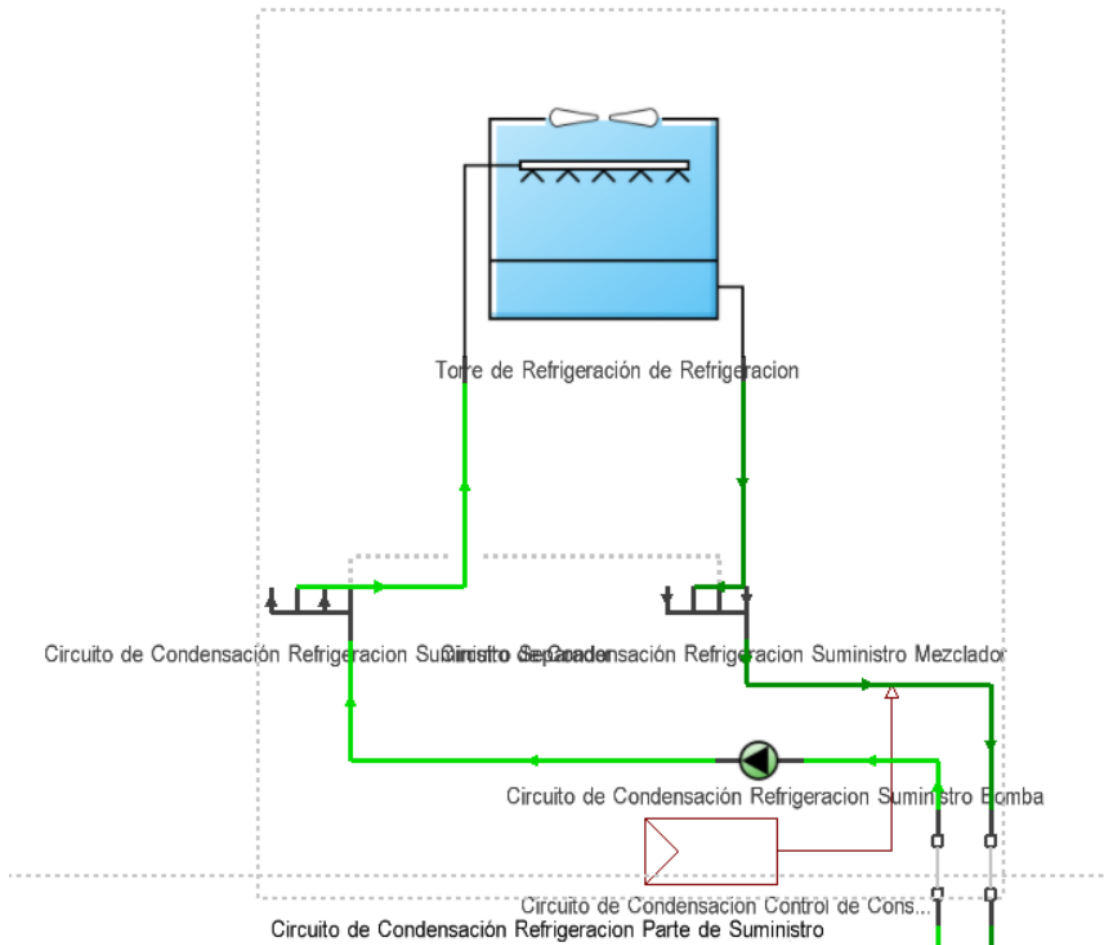


Figura 41: Parte de suministro del circuito de aire

### Circuito de condensación

El circuito de condensación para refrigeración se ha diseñado usando una plantilla de torre de refrigeración. Esta se puede ver en la Figura 42 y los valores para su simulación se han dejado en predeterminados y dejando que se autodimensionen los caudales necesarios. La revisión de resultados pertinentes ha dado un consumo en ventiladores y bombas de circulación razonable así como unas temperatura adecuadas y con eso es suficiente para el análisis de este trabajo, sin tener en cuenta otros criterios como el consumo de agua.



**Figura 42: Parte del circuito de condensación**

### **Circuito de absorción de calor para calefacción**

A la hora de simular un circuito de absorción de calor para bombas de calor en modo calefacción se ha encontrado que la simulación es posible y más adecuada cuando la plantilla usada es la de un intercambiador de calor enterrado.

Se desea aclarar que no se propone el uso real de estos intercambiadores en esta instalación, tan solo se han usado en el modelo de Design Builder poder obtener unos resultados de la simulación que sean parecidos a los de una posible instalación real. Una imagen del modelo de este circuito se puede ver en la Figura 43.

Para su correcto funcionamiento se han ido variando los flujos de agua de los intercambiadores y no se ha profundizado en su diseño ni resultados al simular ya que la única finalidad a ojos de este trabajo es que las bombas de calor de calefacción tengan un intercambio de calor con el exterior adecuado.

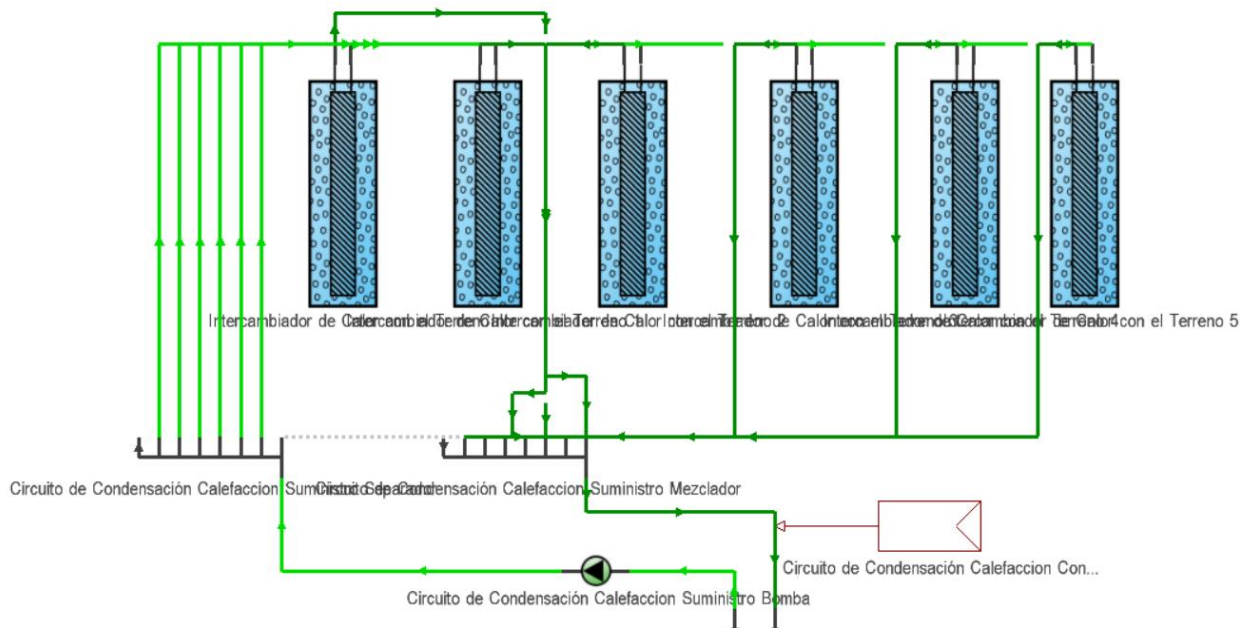


Figura 43: Parte del circuito de absorción de calor para calefacción<sup>1</sup>

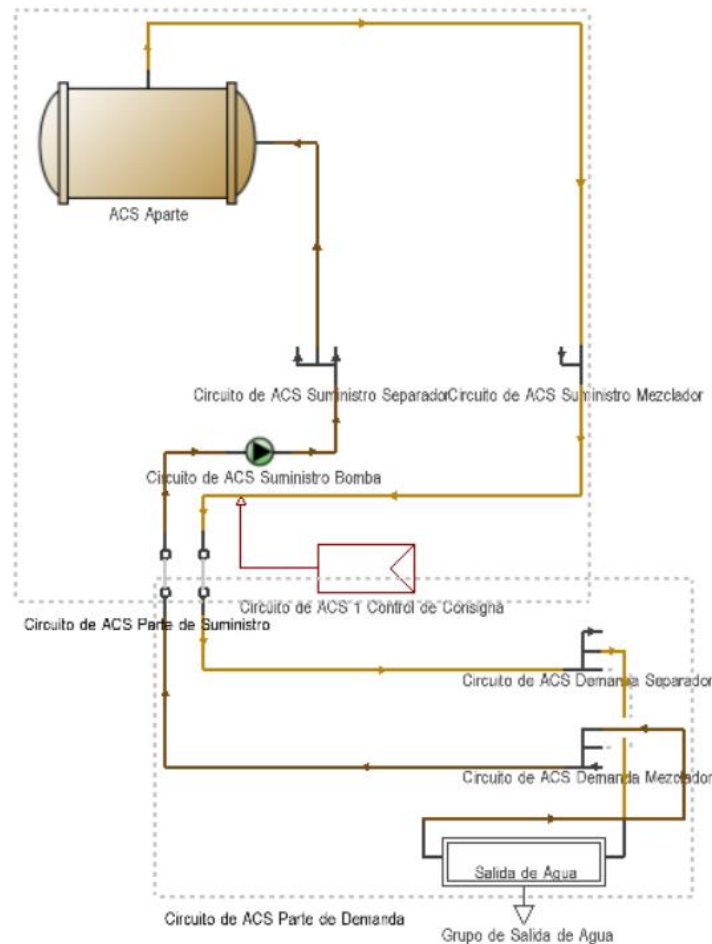
### Circuito de ACS

Se ha usado una plantilla estándar de ACS mediante un calentador eléctrico para satisfacer la demanda de ACS del edificio. La razón es que además de salir del alcance de este trabajo dicha demanda de ACS resulta muy baja ya que la mayor parte del edificio es para usos del sector terciario, cuya demanda de ACS es baja respecto a un uso residencial.

Se puede ver en la Figura 44 el modelado de la plantilla elegida. Esta distribuye ACS a las zonas que lo requieran y autodimensiona la potencia de la resistencia eléctrica del tanque de ACS para satisfacerla así como los flujos de agua caliente y las bombas de circulación que se requieran.

<sup>1</sup> Ignórese la nomenclatura “circuito de condensación de calefacción” ya que es una nomenclatura automatizada y no describe su funcionamiento.





**Figura 44: Circuito de ACS**

### Bombas de calor denominadas “mínimas”

Se han usado en los modelos unas bombas de calor extra aparte de las principales que se han denominado “mínimas”. Estas existen para cuando las demás bombas de calor de calefacción o refrigeración deben estar apagadas, por ejemplo en verano no se activa la calefacción.

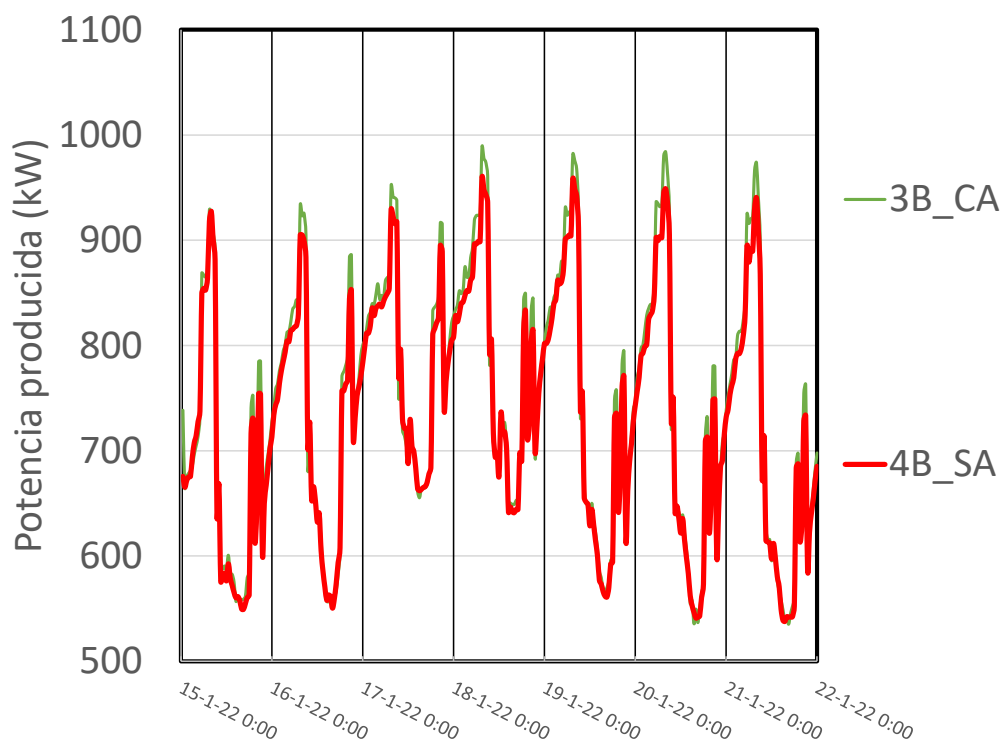
La razón es que Design Builder no permite en el control de disponibilidad desactivar todos los sistemas de producción de calefacción o refrigeración, al menos debe quedar uno activo incluso si este nunca llega a usarse en el periodo simulado y estas bombas mínimas. Por lo tanto incluso si en verano la calefacción jamás se enciende o en invierno la refrigeración jamás se enciende Design Builder necesita tener al menos disponible un sistema de producción (Es decir una bomba de calor) en el circuito de producción.

Para que el impacto de este fenómeno sea mínimo y hasta despreciable se ha usado la plantilla de la bomba de calor de menor potencia presente en Design Builder y se le ha llamado “mínima”, de esta forma si erróneamente se enciende una bomba de frío durante invierno o de calefacción durante verano su potencia máxima es despreciable y no afecta a los resultados de consumo.

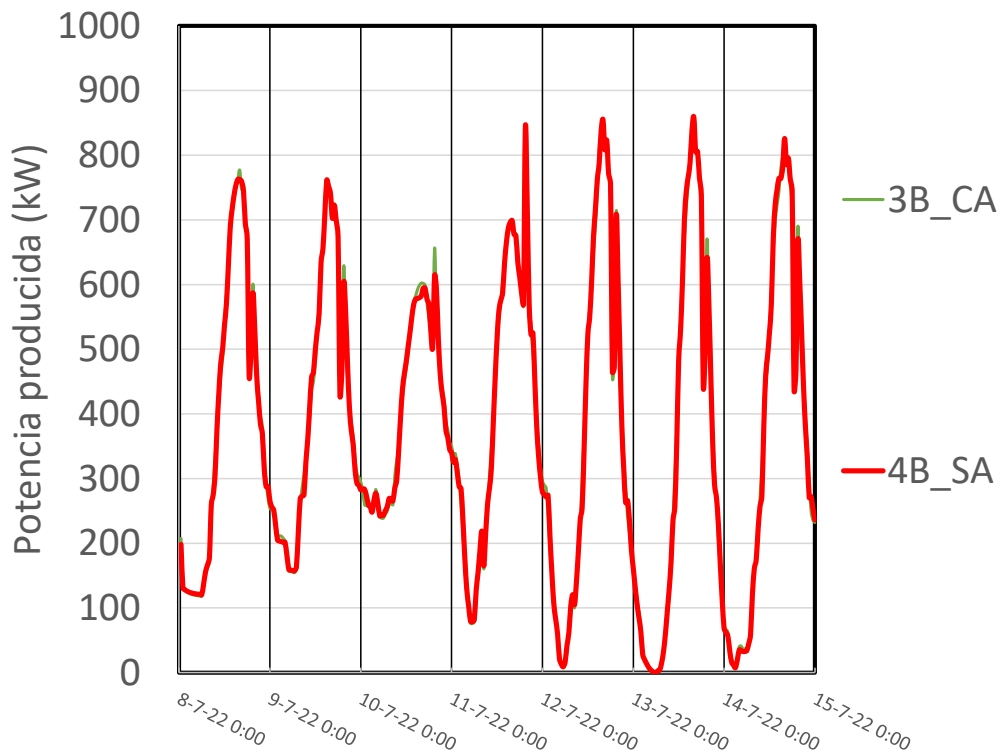
### ANEXO III: Validación de curvas de potencia producida y demanda satisfecha de los modelos estudiados.

A continuación se muestran las curvas de potencia térmica producida por el sistema y llevada al circuito de demanda en invierno y en verano. Esto se ve en la Figura 45 y la Figura 46.

Se aprecia en ambas figuras como tanto en verano como en invierno la potencia que va a demanda del sistema HVACR sin almacenamiento y con almacenamiento es prácticamente idéntica, la ligera diferencia mayor con acumulación en invierno se atribuye a fenómenos del lado de demanda que no entran en el alcance de este trabajo.



**Figura 45: Curvas de potencia otorgada en semana de invierno de sistemas con almacenamiento con 3 bombas de calor y sin almacenamiento con 4 bombas de calor.**



**Figura 46: Curvas de potencia otorgada en semana de verano de sistemas con almacenamiento con 3 bombas de calor y sin almacenamiento con 4 bombas de calor.**

Este análisis se ha repetido para todos los casos estudiados en este trabajo a modo de validación. El análisis realizado de la Figura 45 y la Figura 46 que valida que los sistemas con almacenamiento satisfacen la potencia que demanda el sistema se ha realizado para todos los casos estudiados en este trabajo: Almacenamiento sin consignas y almacenamiento con consignas en semana de invierno, verano y otoño.

Estos resultados tienen todos el mismo análisis: la curva de potencia es casi idéntica en todos los casos y por ende los casos estudiados satisfacen correctamente la demanda. Las curvas de estos resultados se pueden ver de la Figura 47 a la Figura 49.

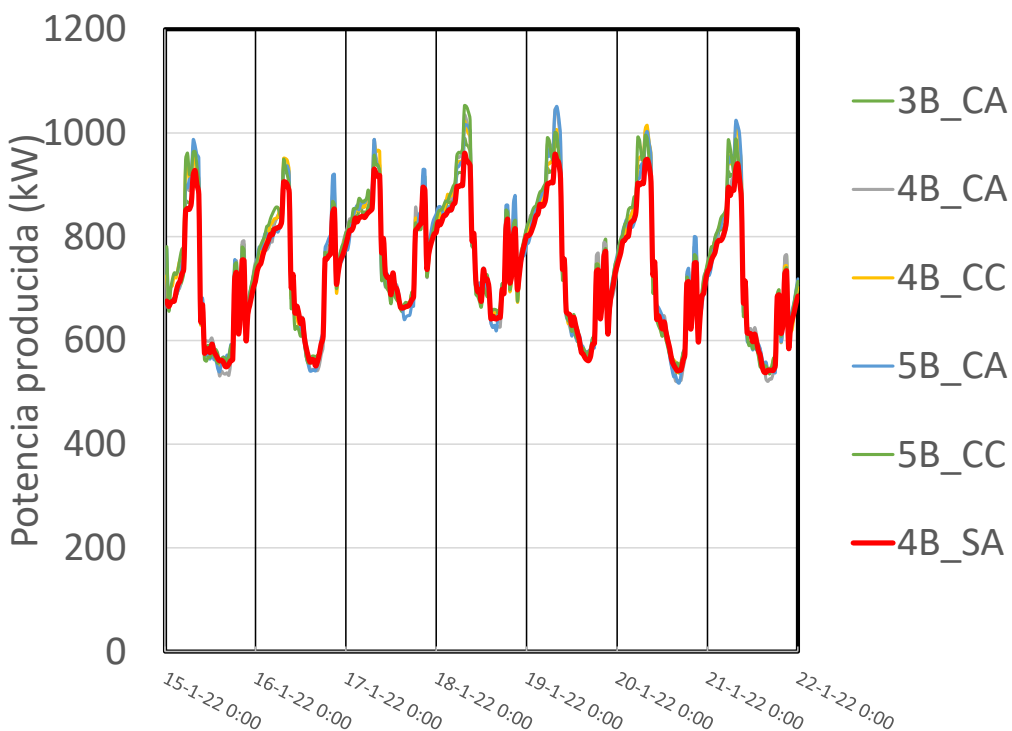


Figura 47: Curvas de potencia otorgada en semana de invierno para todos los modelos estudiados.

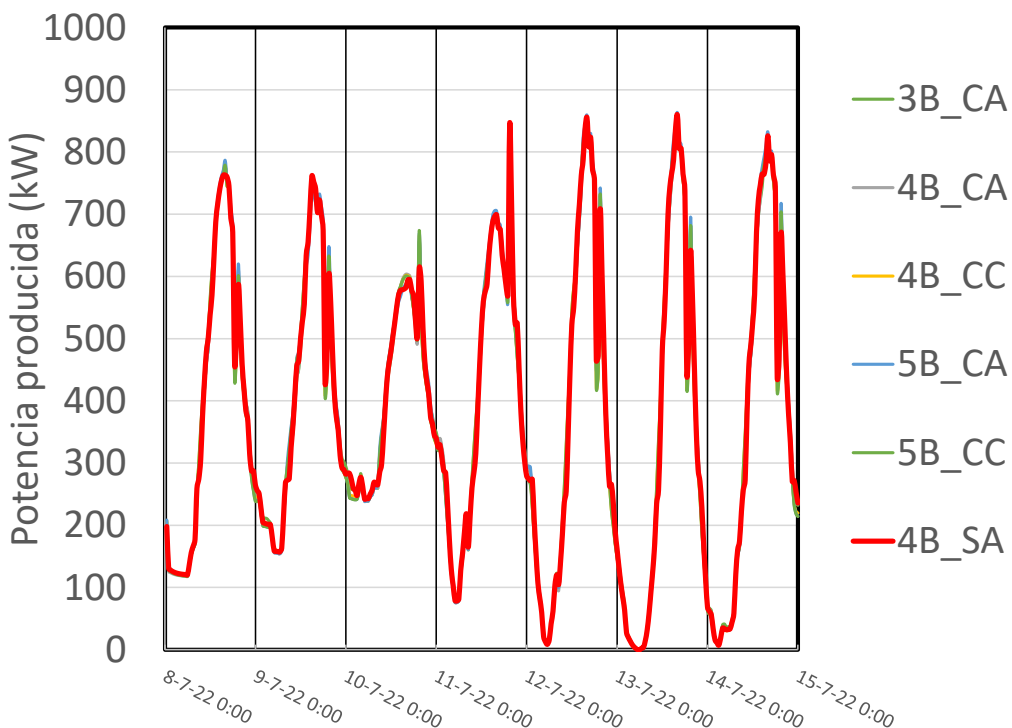


Figura 48: Curvas de potencia otorgada en semana de verano para todos los modelos estudiados.

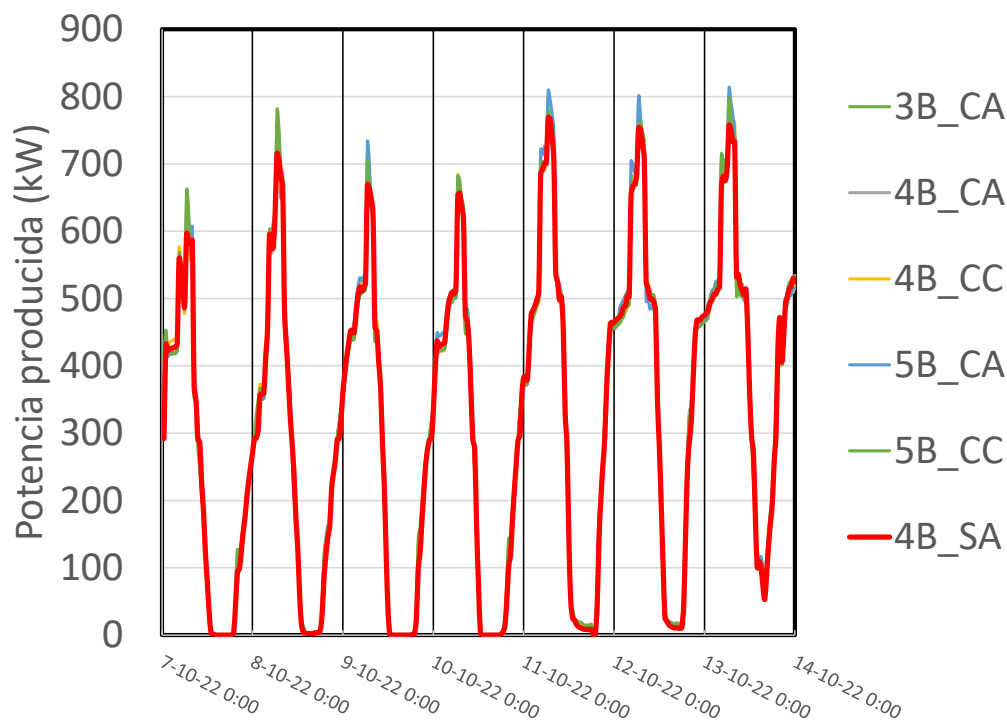


Figura 49: Curvas de potencia otorgada en semana de otoño para todos los modelos estudiados.

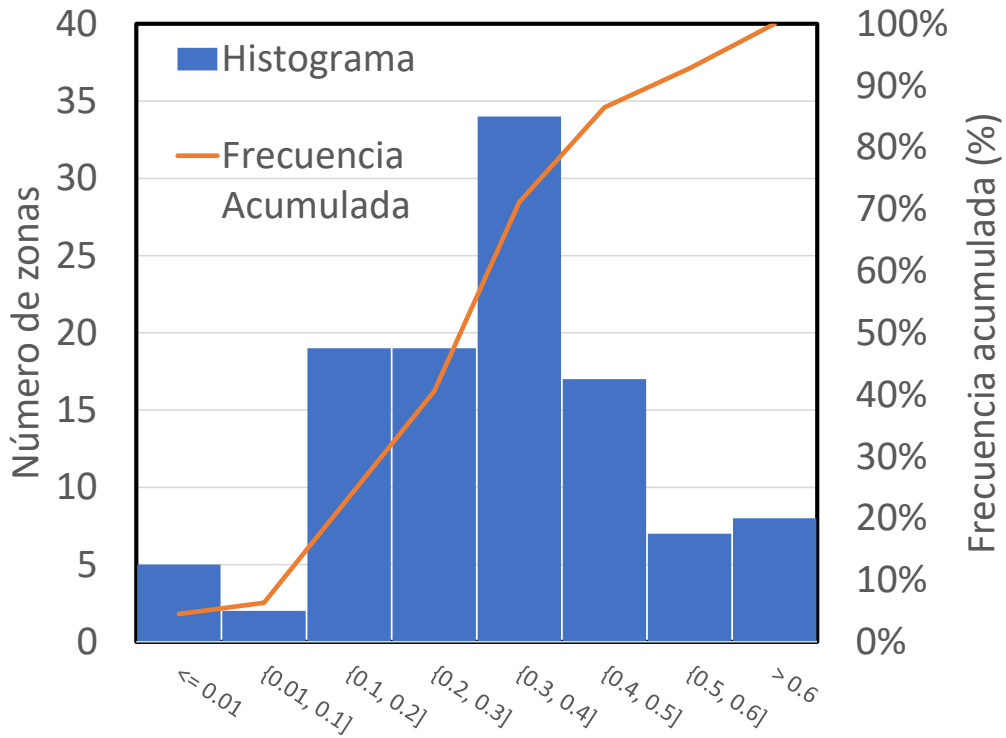
#### ANEXO IV: Validación de temperaturas por zona.

Como segunda forma de validación se han analizado las temperaturas en las diferentes zonas climatizadas del modelo del edificio tanto con 4 bombas de calor y sin almacenamiento como con 3 bombas de calor y con almacenamiento. Analizar las curvas una a una de las más de 100 zonas supone un análisis excesivo, con lo cual se ha decidido comparar las temperaturas de las zonas en los casos con y sin almacenamiento previos y elegir el momento donde la diferencia sea mayor. Si en ese momento de máxima diferencia de temperaturas la variación es pequeña entonces será una segunda validación de que la demanda térmica se satisface correctamente.

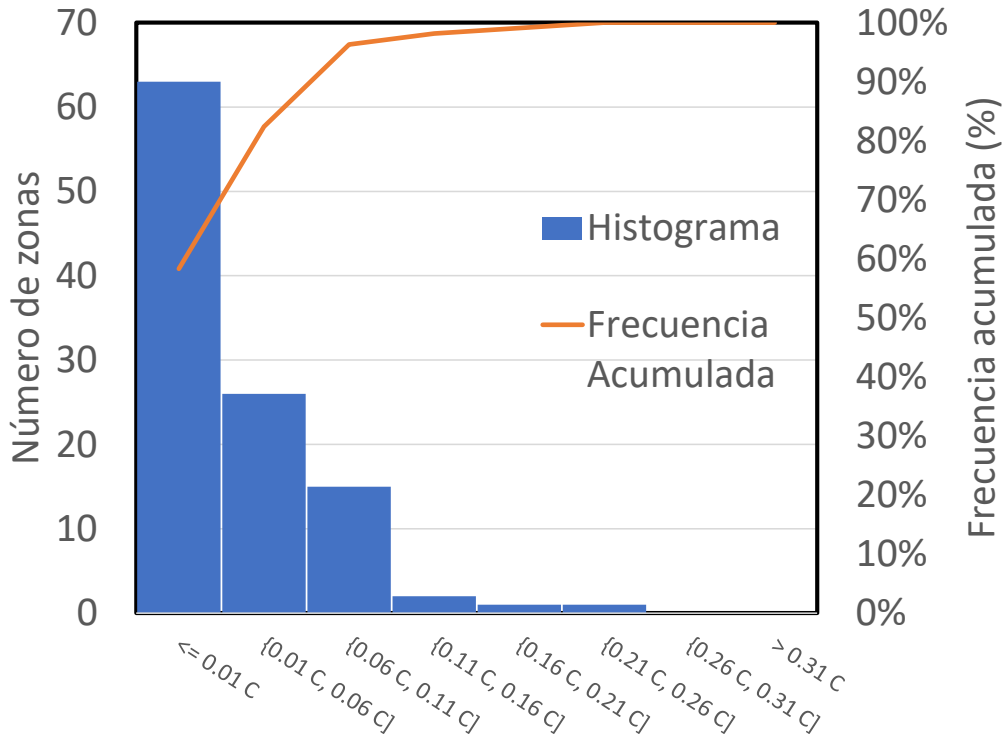
Se han recogido estos resultados de diferencia de temperatura y graficado en forma de los histogramas de la Figura 50 y la Figura 51. En estos se puede ver como en el momento de mayor diferencia media de temperaturas entre zonas si usamos un criterio de 0.5°C de diferencia como referencia:

En invierno se obtiene que casi un 90% de las zonas tienen diferencias menores a 0.5°C entre los casos sin y con almacenamiento.

En verano ninguna zona tiene diferencias mayores a 0.5°C entre los casos sin y con almacenamiento.



**Figura 50: Histograma de diferencia de temperaturas de la misma zona en casos de mínima potencia sin y con almacenamiento en semana de invierno.**



**Figura 51: Histograma de diferencia de temperaturas de la misma zona en casos de mínima potencia sin y con almacenamiento en semana de verano.**

Estas diferencias de temperatura al igual que las diferencias en la curva de demanda son pequeñas y con posiblemente debidas a fenómenos transitorios o referentes a partes del circuito de demanda y modelo de la envolvente del edificio.

## **ANEXO V: Resultados extra de ahorro en verano. Límite por temperatura de congelación.**

Se ha mencionado que en verano el sistema con control de consignas y 5 bombas está limitado por la temperatura de congelación.

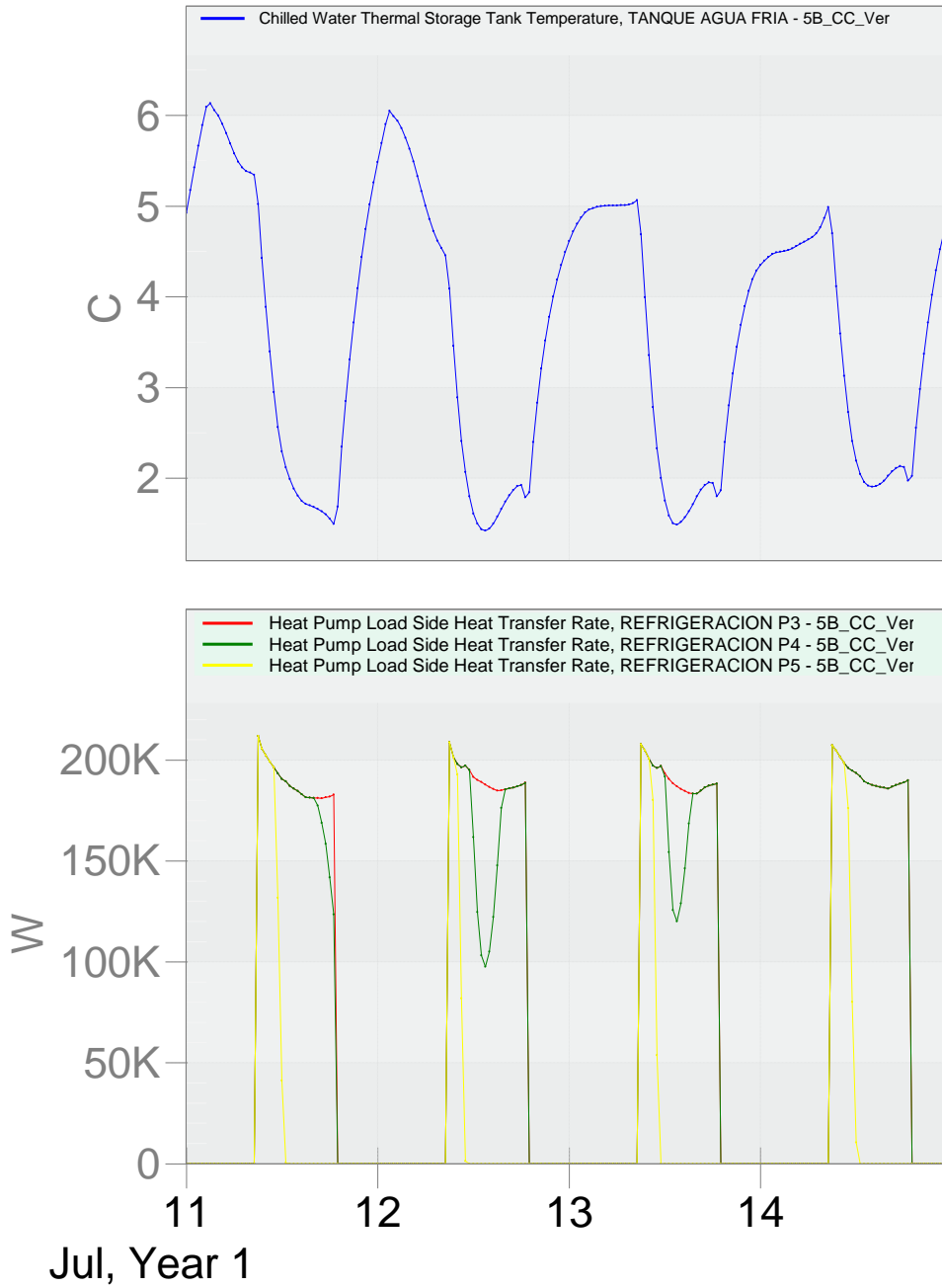
Este sistema trabaja con refrigeración con un salto de 5°C a 12°C, por tanto el tanque debe estar como máximo a 5°C. Si además se quiere sobrecargar entonces el sistema no es capaz de sobrecargar el tanque por debajo de los 2°C ya que el riesgo de congelación en tuberías es demasiado alto, y por ello la 5ª bomba no puede operar a máxima potencia para sobrecargar y aprovechar más la fotovoltaica.

Esto hace que a menos que se estudie un sistema con una mezcla de agua con anticongelante se deduzca que existen unos límites operativos donde mayor potencia instalada no conlleva un mayor ahorro de energía cuando en el tanque se almacena agua para refrigeración.

Esto se reproduce en la Figura 52, donde arriba se puede ver la temperatura del tanque y abajo la potencia de las bombas de calor 3,4 y 5 (las bombas 1 y 2 en lo que interesa a este análisis se comportan exactamente igual que la bomba 3). Se ve claramente como las dos últimas bombas de calor y especialmente la 5ª bomba (curva amarilla) disminuye su potencia hasta incluso apagarse una vez el tanque alcanza su temperatura mínima porque por debajo de esta hay peligro de congelación tanto en el tanque como en tuberías donde el agua tiene que estar incluso a menos de 2°C para poder enfriar el aljibe.

# Timestep Frequency

8 julio, Year 1 [0:30] - 15 julio, Year 1 [0:00]



**Figura 52: Temperatura del tanque y potencia de bombas de calor en semana de verano con uso de consignas.**