



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Caracterización experimental y simulación de una unidad de
tratamiento de aire*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Manuel Lara Sánchez

DIRECTORES: Antón Cacabelos Reyes
Arturo González Gil

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



**Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar**

TRABAJO FIN DE GRADO

*Caracterización experimental y simulación de una unidad de
tratamiento de aire*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

El tratamiento de aire es una preocupación constante para los usuarios de cualquier infraestructura. Con el objetivo de ser capaz de estimar los consumos del sistema de climatización del CUD y optimizar este, se ha realizado una simulación transitoria de dicho sistema, realizando un modelo de la instalación de climatización y del entorno en el que se encuentra. La simulación se ha estudiado bajo distintas condiciones de trabajo con distintos tipos de control, variando los periodos de actividad de esta en base al horario laboral del edificio, con el objetivo de comparar las condiciones del aire en el edificio y el consumo del sistema en cada uno de los escenarios. Se han obtenido resultados acerca de temperaturas, potencias y consumos, que se han comparado con mediciones de trabajos previos. Comparando los distintos escenarios, y contrastando su validez con escenarios reales, se ha indicado que escenario se acoge de manera más precisa al sistema real, en distintos períodos de tiempo.

PALABRAS CLAVE

Tratamiento de aire, UTA, caudal, temperatura, consumo

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores, por apoyarme a pesar de mi falta de disponibilidad en ciertos momentos, de manera didáctica y siempre con voluntad docente, tratando de que aprendiese en todo momento.

A la promoción 154 de Infantes de Marina, por ser la segunda familia que me ha tocado, y sin la cual esta profesión no tendría sentido.

A mi familia, por estar siempre dispuestos a ayudarme a pesar de lo que conlleva la vida en la Escuela.

A Pedro, Javi, y José, porque siempre consiguen sacarme una sonrisa en un día malo, y han hecho de este último año una auténtica experiencia de hermandad. Son muestra definitiva de lo que son los hermanos en armas.

A mi prometida, Ana, por siempre tener palabras de ánimos, desde el primer día que ingrese hasta hoy, a pesar de las dificultades que mi forma de vida conlleva. Gracias por aceptarlas y asumir como propia esta forma de vida que he escogido.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Descripción del apartado.....	6
1.2 Antecedentes	6
1.3 Motivación	6
1.4 Objetivos	7
2 Estado del arte	8
2.1 Descripción del apartado.....	8
2.2 Normativa de ventilación y climatización	8
2.3 Climatización de aire. Pasado, presente y futuro	9
2.4 Sistemas de climatización de aire	10
2.4.1 Tipos de sistemas de climatización.....	11
2.4.2 Componentes de un sistema de climatización	11
2.4.2.1 Unidad de tratamiento de aire	12
2.4.2.2 Fancoils.....	17
2.4.2.3 Bomba de calor	18
2.4.3 Comparación de Sistemas.....	20
2.5 Habitabilidad y climatización de aire.....	20
2.6 Características térmicas de los edificios	21
2.6.1 Impacto de la Ubicación Geográfica	21
2.6.2 Envolvente del edificio	22
2.6.2.1 Tipos de Materiales.....	22
2.6.2.2 Grosor y Diseño.....	22
2.6.2.3 Influencia en el Comportamiento Térmico.....	22
2.6.2.4 Ventanas y su Efecto en el Comportamiento Térmico	23
2.6.3 Uso y Comportamiento Térmico	23
2.7 Emisiones en sistemas de climatización	23
2.7.1 Compuestos Orgánicos Volátiles.....	23
2.7.2 Óxidos de Nitrógeno (NOx)	23
2.7.3 Partículas en Suspensión.....	24
2.7.4 Gases de Efecto Invernadero	24
2.7.5 Impacto en la Salud y el Medio Ambiente	24

2.7.6 Estrategias de Mitigación y Control	24
2.8 Simulación de sistemas de climatización.....	24
2.8.1 Importancia y Aplicaciones de la Simulación	25
2.8.2 Métodos y Herramientas de Simulación.....	25
2.8.3 Beneficios y Resultados.....	25
2.8.4 Desafíos y Consideraciones	25
2.8.5 Futuras Direcciones y Tendencias	25
3 Desarrollo	26
3.1 Descripción del apartado.....	26
3.2 El edificio del CUD-ENM	26
3.2.1 Características constructivas del edificio del CUD-ENM	26
3.2.1.1 Tabique y fachadas	27
3.2.1.2 Ventanas	29
3.2.1.3 Techos y suelos.....	30
3.2.2 El sistema de climatización del CUD-ENM.....	31
3.2.2.1 Funcionamiento en Modo Calentamiento.....	32
3.2.2.2 Funcionamiento en Modo Refrigeración	32
3.2.2.3 Eficiencia y Coeficiente de Rendimiento (COP).....	33
3.2.2.4 Ventajas y Desventajas	33
3.3 Preparación del modelado del edificio.....	33
3.3.1 Modelado en Sketchup	33
3.3.2 Caracterización del edificio	35
3.3.3 Preparación de la simulación	37
3.4 Resumen del apartado	38
4 Resultados	40
4.1 Descripción del apartado.....	40
4.2 Escenarios para la obtención de resultados.....	40
4.3 Consumo semanal de la BC	41
4.4 Consumos diarios de la BC.....	42
4.5 Consumos totales del sistema	43
4.6 Temperaturas.....	44
4.7 Comparación con valores experimentales.....	45
5 Conclusiones y líneas futuras	47
5.1 Descripción del apartado.....	47
5.2 Conclusiones	47
5.3 Líneas futuras.....	48

6 Bibliografía.....49

Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales52

Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Willis Carrier junto a su aire acondicionado Fuente: [5].....	10
Figura 2-2 Filtro de bolsa CAMFIL City-Flo, de 10 bolsas Fuente: [14]	13
Figura 2-3 Clasificación filtros absolutos Fuente: [17].....	14
Figura 2-4 Ventilador centrífugo de doble entrada Fuente: [19].....	14
Figura 2-5 Tipos de álabes Fuente: [19].....	15
Figura 2-6 Calentamiento con humidificación Fuente: [18]	16
Figura 2-7 Enfriamiento con deshumidificación Fuente: [18]	17
Figura 2-8 Esquema fancoil 2 y 4 tubos Fuente: [21]	18
Figura 2-9 Funcionamiento de una bomba de calor	19
Figura 2-10 Bomba de calor geotérmica Fuente: [23].....	20
Figura 3-1 Distribución de los espacios en la planta baja del CUD-ENM.....	27
Figura 3-2 Tabique interior del CUD Fuente: [32]	28
Figura 3-3 Aislante muros de fachada Fuente: [32]	29
Figura 3-4 Dimensiones de las ventanas Fuente: [32]	30
Figura 3-5 Sistema de climatización del CUD	32
Figura 3-6: Bomba de calor en enfriamiento.....	33
Figura 3-7 Modelo de la planta baja del CUD, visto desde el S	34
Figura 4-1 Consumo semanal de la bomba de calor.....	41
Figura 4-2 Consumos diarios de la bomba de calor	42
Figura 4-3 Temperaturas para los escenarios 1 y 2	44
Figura 4-4 Temperaturas para los escenarios 3 y 4	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Leyenda para el tabiques y fachadas del interior del edificio del CUD Fuente: [32]	28
Tabla 3-2 Parámetros de los Fancoils Fuente: [35]	31
Tabla 3-3 Espacios en Sketchup	35
Tabla 3-4 Variables del sistema	36
Tabla 3-5 Características fancoils y UTA	37
Tabla 3-6 Características bomba de calor	38
Tabla 4-1 Escenarios de simulación	40

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Descripción del apartado

En este primer apartado, se pretende dar a conocer al lector la motivación y objetivos del trabajo, así como la estructura de este, junto con los antecedentes de este, para que el lector pueda ponerse en situación antes de comenzar la lectura.

1.2 Antecedentes

El tratamiento de aire en interiores es un aspecto crucial en el diseño y mantenimiento de edificios modernos, tanto residenciales como comerciales. La calidad del aire interior (QAI) tiene un impacto significativo en la salud, bienestar y productividad de los ocupantes. En las últimas décadas, ha aumentado la conciencia sobre la importancia de mantener un ambiente interior saludable, impulsada por el conocimiento de los efectos adversos de la contaminación del aire interior. [1]

La calidad del aire en interiores se ve afectada por varios factores, incluyendo la ventilación, la humedad, la presencia de contaminantes biológicos y químicos, y las condiciones térmicas. Los sistemas de tratamiento de aire, que comprenden ventilación, filtración y control de humedad, juegan un papel esencial en el mantenimiento de una QAI adecuada.

Existen diferentes tecnologías y estrategias para lograr estos objetivos, desde sistemas de ventilación mecánica controlada hasta sistemas avanzados de filtración como los filtros HEPA (High Efficiency Particle Arresting) y purificadores de aire con tecnología de ionización o luz ultravioleta.

El diseño y operación eficientes de los sistemas de tratamiento de aire requieren un enfoque multidisciplinario que abarca la ingeniería, la arquitectura y las ciencias ambientales. Además, la normativa y los estándares internacionales, como los establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), proporcionan directrices esenciales para asegurar una QAI óptima.

1.3 Motivación

La principal motivación de este trabajo es analizar el sistema de climatización la planta baja del Centro Universitario de la Defensa, para predecir y tratar de reducir su consumo. Las condiciones cambiantes de la meteorología en Galicia, la cercanía al mar, y otros factores afectan en gran medida a este sistema, y mediante la recolección de datos experimentales y la simulación, se pretende comprender si nuestros medios funcionan de manera adecuada o, y que se puede hacer para mejorar su funcionamiento.

1.4 Objetivos

La finalidad de este trabajo será dotar al usuario de una herramienta, en este caso un modelo transitorio, que permita predecir el funcionamiento del sistema de climatización del CUD, permitiendo contrastar datos experimentales de otros trabajos, para estudiar formas de reducir el consumo de nuestro sistema. Esto se puede desgranar en los siguientes objetivos:

- Recopilar información sobre el sistema de climatización del CUD, y concretamente de la UTA y la bomba de calor asociada
- Diseñar un modelo informático del sistema de climatización del edificio, y realizar simulaciones bajo distintas condiciones
- Comparar el modelo con datos experimentales, comprobar su exactitud, e identificar las oportunidades de reducción de consumo que se presenten

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Descripción del apartado

En este apartado se expondrán conceptos generales acerca de climatización, los conocimientos necesarios para comenzar a entender el trabajo, y para comprender la línea que se ha intentado seguir en la realización de este.

2.2 Normativa de ventilación y climatización

La principal normativa para tener en cuenta a la hora de tratar calidad de aire interior es el Reglamento de Instalaciones térmicas en edificios (RITE). Aunque el Código Técnico de la Edificación, en su Documento Básico HS3, de calidad del aire interior, también establece una serie de requisitos de calidad de aire, este documento es solo de aplicación para edificios de viviendas, trasteros, aparcamientos y garajes, por lo tanto, no es relevante para nuestro trabajo. [2]

Como se indica en el RD 1027/2007, “El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios tiene por objeto establecer las exigencias de eficiencia energética y seguridad que deben cumplir las instalaciones térmicas en los edificios destinadas a atender la demanda de bienestar e higiene de las personas, durante su diseño y dimensionado, ejecución, mantenimiento y uso, así como determinar los procedimientos que permitan acreditar su cumplimiento.” [3]

Por tanto, en este documento no solo encontraremos los requerimientos relativos a calidad del aire, sino también los relativos a eficiencia, relevantes a nuestro trabajo. El RITE, además de los requerimientos explícitamente indicados en el documento, puede establecer de manera obligatoria, voluntaria o como referencia, otras normas, tanto UNE, como otras reconocidas a nivel europeo o global. Todos los documentos referidos se encuentran en el Registro general de documentos reconocidos en el RITE, de acceso público.

El documento se encuentra dividido en dos partes. En la primera se establecen las condiciones de aplicación del RITE, y las exigencias que deben cumplir las instalaciones. La segunda, llamada instrucciones técnicas o IT, contiene la cuantificación de dichas exigencias, mediante valores límite, procedimientos de comprobación y soluciones para cumplir estas exigencias. Concretamente, el punto IT 1.1.4.2 “Exigencia de calidad del aire interior”, será de especial importancia. [3]

En este apartado se clasifica en primer lugar la calidad de aire necesaria en función del uso del edificio. En nuestro caso, al tratarse de un edificio de oficinas y aulas de enseñanza, nos encontraremos en el grupo IDA 2 (aire de buena calidad). Por tanto, en vista de esta normativa, requeriremos de un caudal de aire exterior de $0,83 \text{ dm}^3/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$, según la tabla 1.4.2.4. En cuanto a la filtración de dicho aire, tomando la calidad del aire exterior como ODA 1, la filtración debe ser del tipo F8 (filtro para polvo fino, eficiencia de filtración entre 90% y 95%).

El otro apartado que es de especial importancia para este trabajo es el 3.8.1. En él se indican que, en entornos calefactados, la temperatura no debe superar nunca los 21°C, y en entornos refrigerados, no debe estar por debajo de los 26°C, manteniendo siempre una humedad entre el 30 y el 70%. Por tanto, deberemos prestar atención a los valores que obtengamos de las simulaciones, para mantenernos dentro de estos márgenes.[3]

La otra norma la cual nos compete es el Real Decreto 486/1997, del 14 de abril, que establece las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo en España. Este decreto es fundamental para asegurar que los entornos laborales sean seguros, saludables y confortables para los empleados, contemplando varios aspectos que van desde la iluminación hasta las condiciones térmicas.

Entre los requisitos esenciales que impone el Real Decreto 486/1997, uno de los más relevantes para los edificios de oficinas es el control de las condiciones térmicas. Específicamente, el decreto regula las temperaturas máximas y mínimas para garantizar un ambiente laboral adecuado.

Para los edificios de oficinas, el Real Decreto 486/1997 establece que en trabajos sedentarios propios de oficinas o similares, la temperatura del ambiente debe mantenerse en un rango confortable. El decreto recomienda que la temperatura no supere los 27 grados Celsius durante el verano y no sea inferior a 17 grados Celsius en invierno. Estos valores están diseñados para asegurar el confort térmico de los trabajadores, optimizando así su bienestar y productividad.[4]

2.3 Climatización de aire. Pasado, presente y futuro

La evolución histórica de la climatización y los sistemas de climatización abarca milenios de desarrollo tecnológico y adaptación a las necesidades humanas. Desde las primeras civilizaciones que utilizaban técnicas rudimentarias para controlar el ambiente interior hasta los sistemas modernos sofisticados, este campo ha experimentado transformaciones significativas. En la antigüedad, los romanos y egipcios empleaban hipocaustos y técnicas de ventilación natural para gestionar el calor y mejorar el confort en sus construcciones. Estos métodos, aunque simples, sentaron las bases para futuros avances en la regulación ambiental en interiores.

Durante la Edad Media y el Renacimiento, surgieron estufas de leña y sistemas de ventilación pasiva en monasterios y palacios europeos, facilitando un control más eficaz de la temperatura y la circulación del aire. Estos desarrollos fueron precursoras de innovaciones más complejas durante la Revolución Industrial, donde la máquina de vapor y la introducción de sistemas de calefacción centralizada revolucionaron la climatización en edificios comerciales y residenciales. El uso extendido de radiadores y calderas permitió una distribución más eficiente del calor, mejorando considerablemente el confort térmico en interiores.

El siglo XX marcó un punto de inflexión con la invención del aire acondicionado moderno por Willis Carrier (Figura 2-1) en 1902. Esta innovación no solo proporcionó refrigeración, sino también la capacidad de controlar la humedad y filtrar el aire, beneficiando la salud y el bienestar de los ocupantes. Desde entonces, los avances tecnológicos han seguido transformando el campo de la climatización. La integración de tecnologías como bombas de calor, sistemas geotérmicos y unidades de recuperación de calor ha mejorado la eficiencia energética y reducido las emisiones de carbono asociadas con la climatización, apoyando la sostenibilidad ambiental.

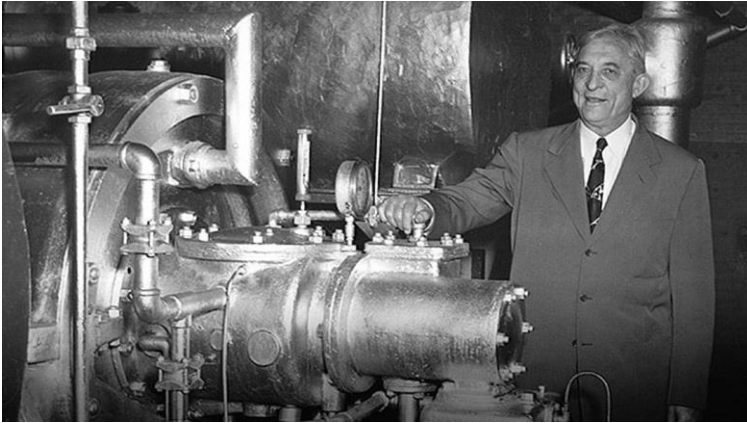


Figura 2-1 Willis Carrier junto a su aire acondicionado Fuente: [5]

En el presente, la investigación y el desarrollo continúan enfocándose en la innovación y la sostenibilidad. Avances en inteligencia artificial, Internet de las Cosas (IOT) y materiales avanzados están impulsando la próxima generación de sistemas de climatización más inteligentes y eficientes. Estos sistemas están diseñados para adaptarse dinámicamente a las condiciones ambientales y las preferencias individuales, mejorando aún más el confort interior y reduciendo el impacto ambiental global. El futuro promete sistemas de climatización que no solo optimicen el consumo de energía, sino que también contribuyan activamente a la mitigación del cambio climático y la preservación de los recursos naturales.

La evolución histórica de la climatización y los sistemas de climatización refleja el progreso continuo hacia ambientes interiores más confortables, saludables y sostenibles. Cada era ha aportado innovaciones significativas que han remodelado nuestra forma de interactuar con el entorno construido, apuntando hacia un futuro donde la tecnología y la responsabilidad ambiental convergen para crear espacios habitables y resilientes. [1], [6]

2.4 Sistemas de climatización de aire

Los sistemas de climatización de aire son fundamentales en la creación de ambientes interiores confortables y saludables en edificios residenciales, comerciales e industriales. Estos sistemas son responsables de controlar la temperatura, la humedad y la calidad del aire interior, proporcionando condiciones óptimas para la habitabilidad y el rendimiento humano. La Guía Técnica 17 del IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) es un documento técnico que proporciona directrices y recomendaciones sobre la eficiencia energética en instalaciones de climatización. Este documento es una referencia esencial para el sector de la climatización y la eficiencia energética en España, y proporciona definiciones y conceptos necesarios en cuanto a sistemas de climatización. [1], [7]

La climatización del aire incluye tanto el calentamiento como la refrigeración, y se refiere a los sistemas y tecnologías utilizados para mantener las condiciones ambientales deseadas en los espacios interiores. Los componentes principales de un sistema de climatización típico incluyen unidades de calentamiento, ventilación y aire acondicionado (HVAC, por sus siglas en inglés). Estos sistemas trabajan en conjunto para regular la temperatura, eliminar contaminantes y mantener un nivel adecuado de humedad.[8]

Los objetivos principales de los sistemas de climatización son:

- **Control de Temperatura:** Mantener la temperatura interior en un rango confortable, generalmente entre 17°C y 27°C, dependiendo del clima y las preferencias de los ocupantes.
- **Control de Humedad:** Regular la humedad relativa del aire interior, idealmente entre 30% y 70%, para prevenir la proliferación de moho y otros microorganismos.

- Calidad del Aire Interior: Filtrar y purificar el aire para eliminar partículas, gases y otros contaminantes que pueden afectar la salud de los ocupantes.
- Eficiencia Energética: Optimizar el uso de energía para minimizar el consumo y reducir los costos operativos y el impacto ambiental.

El diseño y la implementación de sistemas de climatización eficientes requieren un enfoque integral que considere factores como la arquitectura del edificio, las condiciones climáticas locales, el comportamiento de los ocupantes y los avances tecnológicos. En los últimos años, ha habido un creciente interés en desarrollar sistemas de climatización más sostenibles y energéticamente eficientes, aprovechando tecnologías como los sistemas de bomba de calor o la energía solar.[9], [10]

2.4.1 Tipos de sistemas de climatización

Si bien existen múltiples tipos de sistemas de climatización, con características diversas, la Guía técnica 17 de la IDAE recoge los siguientes tipos de sistemas de climatización: [7]

- Sistemas de aire acondicionado individual: Entre los sistemas de aire acondicionado individual se encuentran las unidades de ventana y los sistemas split. Las unidades de ventana son equipos compactos que se instalan en una ventana o en una pared, ideales para climatizar una sola habitación, relativamente económicos y fáciles de instalar. Por otro lado, los sistemas split están compuestos por una unidad interior y una exterior, ofreciendo mayor eficiencia y menor nivel de ruido en comparación con las unidades de ventana. Estos sistemas pueden climatizar una o varias habitaciones dependiendo del número de unidades interiores conectadas a la unidad exterior.
- Sistemas de aire acondicionado centralizado: incluyen los sistemas de conductos y los sistemas de volumen de refrigerante variable. Los sistemas de conductos distribuyen el aire acondicionado a través de una red de conductos en todo el edificio, ofreciendo un control centralizado y una distribución uniforme del aire, aunque requieren un espacio considerable para la instalación de los conductos. Estos sistemas permiten controlar de forma independiente la temperatura en diferentes zonas del edificio, con alta eficiencia energética y flexibilidad en la instalación, siendo adecuados para edificios grandes con múltiples zonas.
- Sistemas de bomba de calor: se destacan las bombas de calor aire-aire, aire-agua y geotérmicas. Dado que este será el tipo de sistema que nos encontraremos en el edificio del CUD-ENM, las características y tipos de bombas de calor se explican con mayor detalle en el apartado 2.4.2.3.
- Sistemas hidráulicos: Los sistemas hidráulicos, como las calderas y radiadores, utilizan agua caliente producida por una caldera para calefacción, pudiendo ser de gas, gasoil o eléctricas, y distribuyen el calor a través de radiadores en las diferentes estancias. Los sistemas de suelo radiante, por su parte, utilizan una red de tuberías bajo el suelo para distribuir agua caliente, proporcionando una calefacción uniforme y confortable y pudiendo funcionar con calderas convencionales o bombas de calor.
- Sistemas de climatización con energías renovables: incluyen los sistemas solares térmicos y los sistemas de biomasa. Los sistemas solares térmicos utilizan colectores solares para capturar la energía del sol y calentar agua, integrándose con otros sistemas de calefacción y agua caliente sanitaria, y reduciendo significativamente el consumo energético y las emisiones de CO₂. Los sistemas de biomasa utilizan biomasa, como pellets de madera, para producir calor, siendo una alternativa sostenible y renovable a los combustibles fósiles y pudiendo ser utilizados en calderas y estufas de biomasa. [7]

2.4.2 Componentes de un sistema de climatización

En primer lugar, para ser capaz de comprender el presente sistema, se ha llevado a cabo un trabajo previo de estudio acerca de sistemas de climatización, sus componentes y usos. De dicho estudio, se han

extraído una serie de conceptos que serán necesarios para poder posteriormente entrar en profundidad en el caso concreto del CUD-ENM. Si bien los componentes de los sistemas de climatización varían en función de múltiples factores, a continuación, se exponen aquellos más comunes y que nos encontraremos en el apartado 3.

2.4.2.1 Unidad de tratamiento de aire

Las unidades de tratamiento de aire (UTA, por sus siglas) son equipos que proporcionan ventilación, acondicionamiento y climatización de aire para el interior los edificios. Están diseñadas para acondicionar el aire que se procesa en los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado, y para moverlo por todo el sistema de climatización. Las unidades de tratamiento de aire se utilizan típicamente en aplicaciones comerciales medianas a grandes y pueden instalarse tanto en interiores como en exteriores. Los sistemas HVAC modernos tienden a incluir múltiples UTA para controlar diferentes zonas.[11]

La necesidad de utilizar UTAs surge por varias razones. En primer lugar, juegan un papel crucial en el control de la calidad del aire interior, ya que filtran el aire para eliminar partículas contaminantes, alérgenos y otros agentes nocivos. Además, estas unidades son esenciales para la regulación de la temperatura, asegurando que los espacios interiores mantengan un nivel de confort adecuado. También son vitales para el control de la humedad, lo que ayuda a mantener condiciones saludables dentro de los edificios. Asimismo, las UTAs garantizan la renovación constante del aire, evitando la acumulación de dióxido de carbono y otros gases perjudiciales. Desde el punto de vista energético, optimizan el uso de energía en los sistemas HVAC, contribuyendo a la eficiencia energética general del edificio. [11]

Existen varios tipos de unidades de tratamiento de aire, cada una con un propósito concreto. En primer lugar, las UTAs modulares consisten en componentes independientes que pueden configurarse y combinarse según las necesidades particulares del edificio, ofreciendo flexibilidad en la instalación y el mantenimiento. Por otro lado, las UTAs compactas integran todos los componentes necesarios en un solo gabinete, siendo ideales para aplicaciones donde el espacio es limitado.

Las UTAs de recuperación de energía incorporan intercambiadores de calor que permiten recuperar energía del aire de extracción para preacondicionar el aire de suministro, mejorando así la eficiencia energética del sistema. En entornos específicos como hospitales, laboratorios y áreas limpias, se utilizan UTAs con tratamiento de aire especializado, equipadas con filtros HEPA y sistemas de desinfección para cumplir con altos estándares de calidad del aire. Además, existen UTAs de deshumidificación diseñadas especialmente para controlar y reducir la humedad en ambientes como piscinas, centros de datos y espacios industriales. [1], [11]

Las UTAs en general consta esencialmente de dos partes, claramente diferenciadas; impulsión y extracción. Ya que, en nuestro caso particular en el CUD, la segunda no existe, nos centraremos en la parte de impulsión, que trata el aire desde que entra en la unidad del exterior, hasta que sale de la UTA. Consta de distintas partes, las cuales iremos explicando en este apartado. Desde que el aire entra en la UTA, hasta que está en disposición de ser distribuido al interior del edificio, transcurre por distintas unidades: [11]

- Filtro: La definición de filtro es elemento de un sistema de ventilación que sirve para retener la suciedad del aire, con el fin de evitar el ensuciamiento de los dispositivos y aparatos por los que éste pasa y la contaminación del aire exterior. Una vez el aire se ha introducido en la UTA, transcurre a través de un primer filtro. Los tipos de filtro que se pueden utilizar en unidades de tratamiento de aire son filtros de bolsa, planos y absolutos. [12]

Los filtros de bolsa son los más utilizados para aplicaciones de tratamiento de aire HVAC, o como prefiltro en instalaciones HEPA. Constan de 4 a 12 bolsas colocadas en paralelo, como

se observa en la Figura 2-1, de tamaño variable. Existen de distintos tipos dependiendo del propósito, con filtros de mayor o menor grosor. [12], [13]



Figura 2-2 Filtro de bolsa CAMFIL City-Flo, de 10 bolsas Fuente: [14]

Los filtros planos son de aplicación general, pensados para capturar principalmente polvo en suspensión en concentraciones ligeras y medias, y actúan más habitualmente como prefiltros, aunque pueden actuar como filtros principales en entornos reducidos. Desempeñan, al igual que los anteriores, un papel clave, permitiendo alargar la vida útil de otros filtros de menor grosor pensados para trabajar con aire previamente tratado. Dentro de estos tipos de filtro, hay numerosas posibilidades, en función, de nuevo, del grosor, tamaño, y demás parámetros relevantes. [15]

Por último, los filtros absolutos son esenciales en unidades de tratamiento de aire con necesidad de una calidad de aire mayor que los casos anteriores. Están compuestos por fibras de vidrio no mayores de $1\mu\text{m}$, y un medio filtrante no mayor de 1mm de tamaño. Están diseñados para atrapar al menos el 99,95% de las partículas del aire, incluyendo bacterias y polen. Existen tres tipos, EPA, ULPA y HEPA.

Los filtros EPA (Efficiency Particulate Air) tienen una eficiencia que oscila del 85% hasta el 99,5%, siendo los menos eficientes de los filtros absolutos.

Los filtros HEPA (High Efficiency Particulate Air) tienen una eficiencia de entre el 99,5% y el 99,995%. Son los más conocidos debido al papel de especial relevancia que ganaron en la pandemia, ya que se volvieron el estándar en calidad de aire en interiores.

Por último, los filtros ULPA (Ultra Low Particulate Air) ofrecen eficiencias de hasta el 99,99995%, siendo estos reservados para entornos especialmente sensibles en cuanto a calidad del aire, también debido a su elevado coste. [16]

Dentro de cada uno de estos filtros, existen clasificaciones internas, como se muestra en la figura adjunta, en función de la eficiencia. Esta clasificación proviene de la norma UNE-EN 1822, para filtros de aire.

Clase filtro EN 1822		Valor integral	
		Eficiencia %	Penetración %
EPA	E10	≥ 85	≤ 15
EPA	E11	≥ 95	≤ 5
EPA	E12	≥ 99,5	≤ 0,5
HEPA	H13	≥ 99,95	≤ 0,05
HEPA	H14	≥ 99,995	≤ 0,005
ULPA	U15	≥ 99,9995	≤ 0,0005
ULPA	U16	≥ 99,99995	≤ 0,00005
ULPA	U17	≥ 99,999995	≤ 0,000005

Figura 2-3 Clasificación filtros absolutos Fuente: [17]

- Ventilador: Es un dispositivo al que se le suministra trabajo desde una fuente externa, a través de un eje rotatorio, para incrementar la presión de un fluido. Si bien esta definición es común a ventiladores, compresores y bombas, los ventiladores son utilizados en su mayoría para movilizar gases, y el incremento de la presión es menor que en los otros dos casos. [18]

Existen multitud de tipos de ventiladores, con diversas características y modos de funcionamiento. Sin embargo, el propósito siempre será el mismo; impulsar un caudal desde una entrada a una salida. Dicho esto, para este apartado se ha escogido explicar el ventilador centrífugo de doble aspiración, con palas abatibles, que será el caso particular que nos encontramos en el apartado 3.2.2.

El adjetivo de centrífugo hace referencia a la aspiración. Esta se realiza de manera axial en el centro de la bomba, realizando la descarga de aire de manera radial a través de la carcasa de este. Este tipo de bombas son fácilmente reconocibles, ya que están formadas por un rodete, que realiza un movimiento giratorio para realizar la aspiración del aire, un elemento difusor, y una flecha rotatoria, que transmite el giro al rodete. De doble aspiración quiere decir que la entrada de aire se realiza por ambas direcciones del eje de giro del rodete. En la figura siguiente, se observa un ejemplo de este tipo de ventilador, observándose como el aire puede entrar por ambos lados, y la salida en la parte superior en el sentido de giro del ventilador.

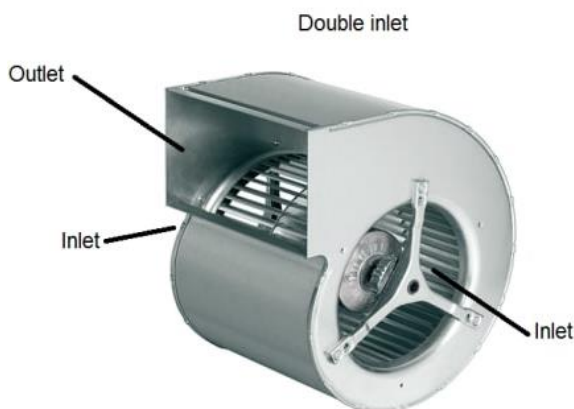


Figura 2-4 Ventilador centrífugo de doble entrada Fuente: [19]

Las palas abatibles proporcionan gran versatilidad al sistema. En general, existen tres clasificaciones respecto al tipo de palas: rectas o radiales, hacia delante, cuando los álabes

están orientados a favor del giro, y hacia detrás, cuando los álabes están orientados en contra del giro (Figura 2-5). Los álabes colocados hacia delante son generalmente considerados menos eficientes, y consumen más energía para un mismo caudal. Los radiales se encuentran en un punto intermedio a niveles de eficiencia. Por otro lado, los álabes curvados hacia delante tienen la capacidad de manejar mayores volúmenes de aire, a menores velocidades. Por tanto, la elección del ángulo de los álabes depende de varios factores: eficiencia, caudal de aire máximo requerido, relación entre tamaño de la unidad y operación que proporciona, y consumo requerido. Por tanto, un ventilador que nos permite variar entre configuraciones nos permitirá obtener siempre elevadas eficiencias en función del requerimiento de caudal de entrada de la unidad. [19]

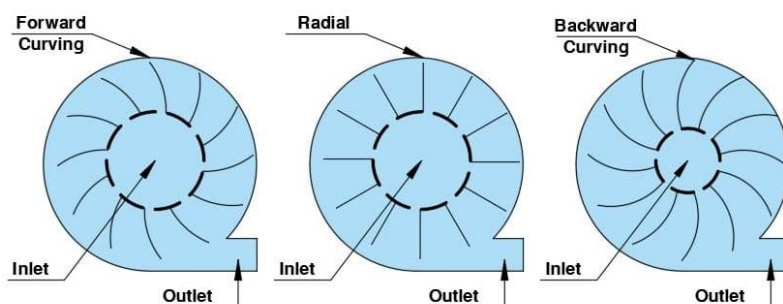


Figura 2-5 Tipos de álabes Fuente: [19]

- Componentes de calentamiento y enfriamiento: Estos sistemas son los encargados de que el caudal de entrada al edificio se encuentre en las condiciones indicadas. Generalmente, deben ser reversibles o existir uno para refrigeración y otro para calentamiento, en función de la temperatura exterior. Además, se deberá tener en cuenta adaptar los sistemas ante el posible aumento de la humedad relativa. [11]

En primer lugar, debemos establecer si la transferencia de calor se realizará de manera directa o indirecta. La transferencia de calor directa es aquella que se realiza sin necesidad de un fluido como intermediario, por ejemplo, con una resistencia, y la transferencia de calor indirecta es aquella en la que si existe un fluido que actúa como intermediario. [20]

Comenzando con el calentamiento, aumentar la temperatura de un caudal de aire conlleva una disminución de la humedad relativa (Figura 2-6). Los problemas asociados con la humedad relativa baja, debido al calentamiento del aire, se eliminan humidificando el aire calentado. Para ello, tras hacer pasar el aire por una sección de calentamiento, deberá pasar por un humidificador. En función de cómo se realice esta humidificación, podremos encontrar que la temperatura aumenta aún más al aplicar vapor sobre el caudal de entrada, o que disminuye, si rociamos el caudal de entrada con agua en estado líquido a menor temperatura. En todo caso, se debe contemplar esta variación a la hora de realizar los cálculos pertinentes. Esto se puede observar en la carta psicrométrica a continuación, siendo 1 el punto inicial, 2 el calentamiento y 3 el caudal ya humidificado.

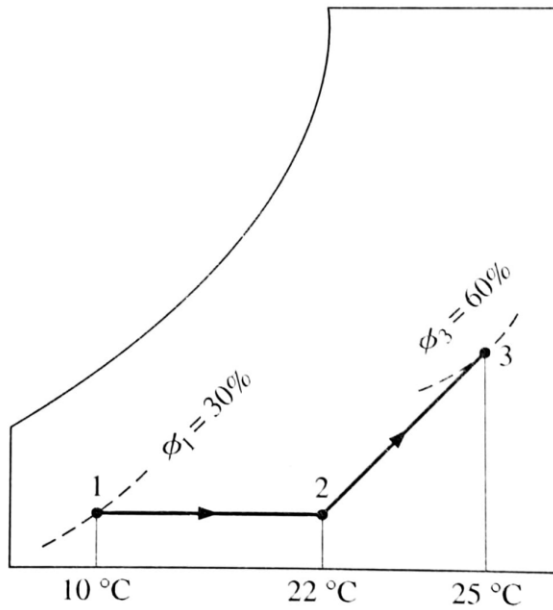


Figura 2-6 Calentamiento con humidificación Fuente: [18]

Por otro lado, los sistemas de enfriamiento aumentan la humedad relativa del caudal de aire, lo cual puede generar un problema aún más significativo, especialmente en climas húmedos como en el que nos encontramos. Para evitar este efecto, se debe llevar a cabo una deshumidificación del aire. Esto se realiza enfriando el aire por debajo de la temperatura de rocío, consiguiendo así la condensación de una parte del agua del fluido, ya que se encuentra saturado, eliminando este vapor de agua resultante por un canal independiente. Si es necesario, se puede volver a calentar el aire si su temperatura se ha reducido demasiado, antes de llevarlo al interior del edificio en cuestión. En la siguiente carta psicrométrica, vemos el proceso de enfriamiento a humedad absoluta constante, y a continuación la deshumidificación. [18]

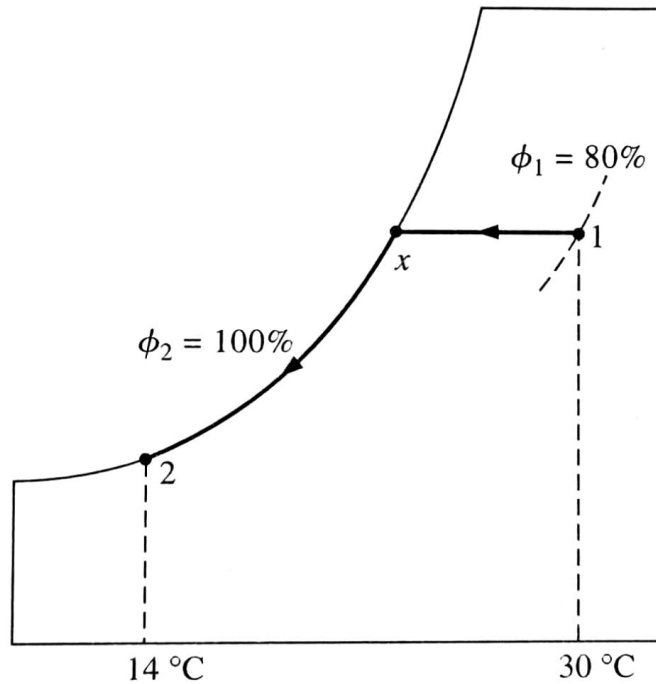


Figura 2-7 Enfriamiento con deshumidificación Fuente: [18]

2.4.2.2 Fancoils

Un fancoil se define como una unidad consistente de un sistema de refrigeración o calentamiento y un ventilador, que forma parte de un sistema HVAC. Normalmente, estas unidades no están conectadas a conductos, y se utilizan para controlar el caudal de aire y la temperatura en una o varias estancias o espacios. Se controlan mediante termostatos.

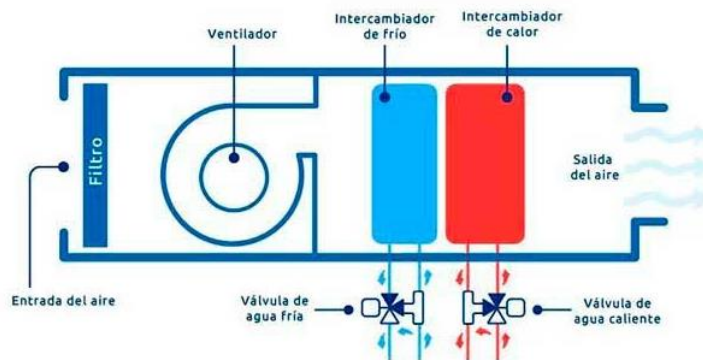
Debido a su simplicidad, son opciones asequibles en entornos en los que no se requiere de una UTA, ya sea porque el espacio no lo necesita o porque ya se tiene una en el sistema. Se presentan en dos configuraciones esenciales, horizontales (cuando se encuentran colgantes de un techo) o verticales (cuando están ubicados en el suelo de la estancia).

Por otra parte, también se pueden clasificar en expuestos u ocultos. Un fancoil expuesto puede ser tanto horizontal como vertical, suele incluir una cubierta que proteja la unidad, y un sistema de distribución del aire de salida dentro de dicha cobertura. Por otra parte, un fancoil oculto se suele concebir en su configuración horizontal. Las entradas y salidas de aire estarán normalmente conectadas mediante conductos de aire, lo que permite adaptarse a la arquitectura del edificio de manera sencilla, aunque también pueden tener la admisión o salida de aire sin conducto, de tal manera que conecte directamente con un plenum. Un plenum es aquel espacio donde existen gases a presiones superiores a la atmosférica debido a algún tratamiento (precisamente, como un fancoil). Este plenum, ubicado generalmente encima del espacio que queremos ventilar, al encontrarse a mayor presión, llevará al aire a dicho espacio a través de las conexiones que se realicen. Otro nombre con el que se habla de estos entornos es el de falso techo, aunque realmente este último es aquella superficie que separa precisamente el plenum de la estancia inmediatamente inferior, y además los falsos techos tienen otras aplicaciones.

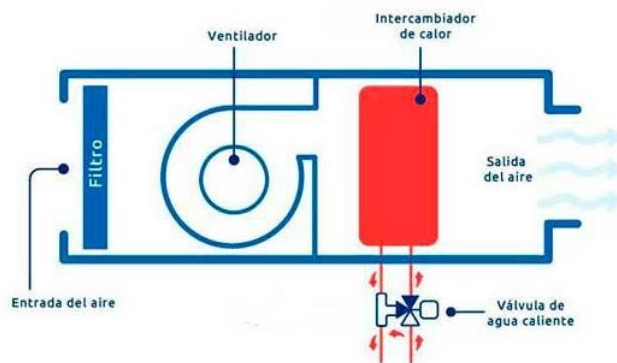
Los fancoils se presentan habitualmente con una entrada y una salida, o dos, en función de cómo se vaya a realizar el tratamiento térmico. Independientemente de esto, es probable que al realizar el enfriamiento se produzca la condensación de parte del vapor de agua, para lo cual la mayoría de fancoils están dotados de una bandeja auxiliar para recoger el agua de condensación.

Por último, en cuanto al tratamiento térmico realizado por los fancoils, se distinguen dos clasificaciones para los fancoils. De cuatro y de dos tubos. Los fancoils de cuatro tubos son aquellos en

los que los intercambiadores de calentamiento y enfriamiento son distintos, mientras que en los fancoils de dos tubos, calentamiento y enfriamiento utilizan el mismo intercambiador. Estas dos disposiciones se observan claramente en la Figura 2-8. [1]



Esquema Fancoil a 4 tubos



Esquema Fancoil a 2 tubos

Figura 2-8 Esquema fancoil 2 y 4 tubos Fuente: [21]

2.4.2.3 Bomba de calor

Una bomba de calor es un dispositivo que transfiere energía térmica de un lugar a otro, utilizando el primer principio de la termodinámica, para proporcionar calefacción o refrigeración a un fluido. A diferencia de los sistemas tradicionales de calefacción que generan calor mediante combustión o resistencia eléctrica, las bombas de calor extraen calor de una fuente externa (como el aire, el agua o el suelo) y lo trasladan a otro lugar. Este proceso es eficiente y sostenible, ya que puede proporcionar más energía térmica de la que consume en electricidad.[22]

Una bomba de calor consta de varios componentes fundamentales que trabajan juntos para transferir energía térmica de una fuente. Estos componentes son esenciales para el ciclo de refrigeración o calefacción, y el funcionamiento eficiente del dispositivo. Los componentes comunes a todas las bombas de calor son compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador, cuyo funcionamiento se explica a continuación, acompañado del esquema de la Figura 2-9:

- El compresor es una pieza clave del sistema de la bomba de calor. Su función principal es comprimir el refrigerante, aumentando su presión y temperatura. El refrigerante en estado gaseoso se comprime para que pueda liberar calor en pasos posteriores, cuando pase a través del condensador.
- El condensador es un intercambiador de calor donde el refrigerante a alta presión y temperatura cede su calor al aire o al agua del entorno interior del edificio. Durante este proceso, el refrigerante se condensa y cambia de estado gaseoso a líquido.

- La válvula de expansión es responsable de reducir la presión del refrigerante líquido antes de que ingrese al evaporador. Al reducir la presión, la válvula de expansión permite que el refrigerante se expanda y baje su temperatura, preparándolo para absorber calor en el evaporador.
- El evaporador es otro intercambiador de calor donde el refrigerante, ahora a baja presión y temperatura, absorbe calor del entorno exterior (como el aire, el agua o el suelo). Durante este proceso, el refrigerante se evapora y cambia de estado líquido a gaseoso. Este calor absorbido es luego transportado por el refrigerante al compresor para iniciar un nuevo ciclo.

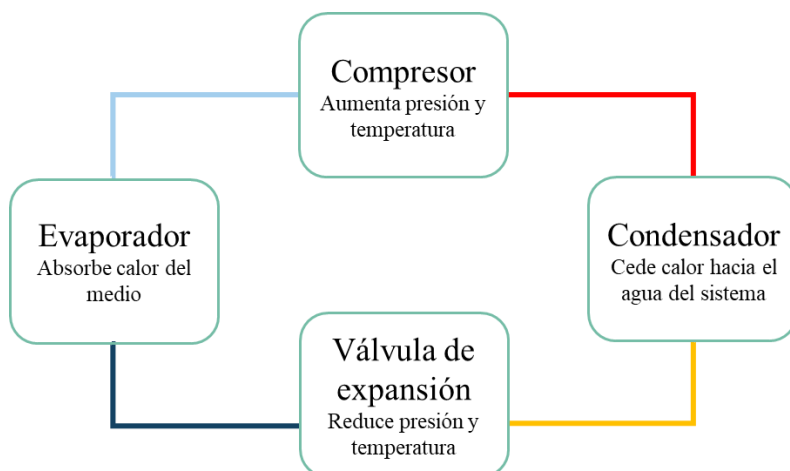


Figura 2-9 Funcionamiento de una bomba de calor

Dentro de los tipos de bomba de calor, encontramos cuatro tipos fundamentales en función de cuál sea el fluido que circula a través de la bomba de calor, y el fluido del edificio o sistema al que se le aporta o retira energía:

- **Bomba de Calor Aire-Aire:** Utiliza el aire exterior como fuente de calor en invierno y como disipador de calor en verano. Estos sistemas son eficientes en climas moderados, pero su rendimiento puede disminuir en temperaturas extremas. Las unidades de aire acondicionado divididas y los sistemas split son ejemplos típicos de este tipo de sistema. La instalación es relativamente sencilla y la inversión inicial es moderada.
- **Bomba de Calor Aire-Agua:** En estos sistemas, el aire exterior es la fuente de calor en invierno y el disipador de calor en verano, pero la transferencia térmica se realiza a través de un circuito de agua que puede alimentar radiadores, suelo radiante o fan coils. Son más eficientes energéticamente que los sistemas aire-aire en aplicaciones de calentamiento debido a la alta capacidad calorífica del agua y su capacidad para distribuir el calor de manera más uniforme. Sin embargo, requieren una instalación más compleja y una inversión inicial más alta.
- **Bomba de Calor Geotérmica:** Este sistema utiliza el subsuelo como fuente y sumidero de calor. Durante el invierno, extrae calor del suelo (que mantiene una temperatura relativamente constante) y lo transfiere al agua del sistema que luego calienta el edificio. En verano, el proceso se invierte y el calor del edificio se transfiere al subsuelo. Las bombas de calor geotérmicas son altamente eficientes y sostenibles, pero requieren una instalación compleja y costosa de intercambiadores de calor enterrados (Figura 2-10).

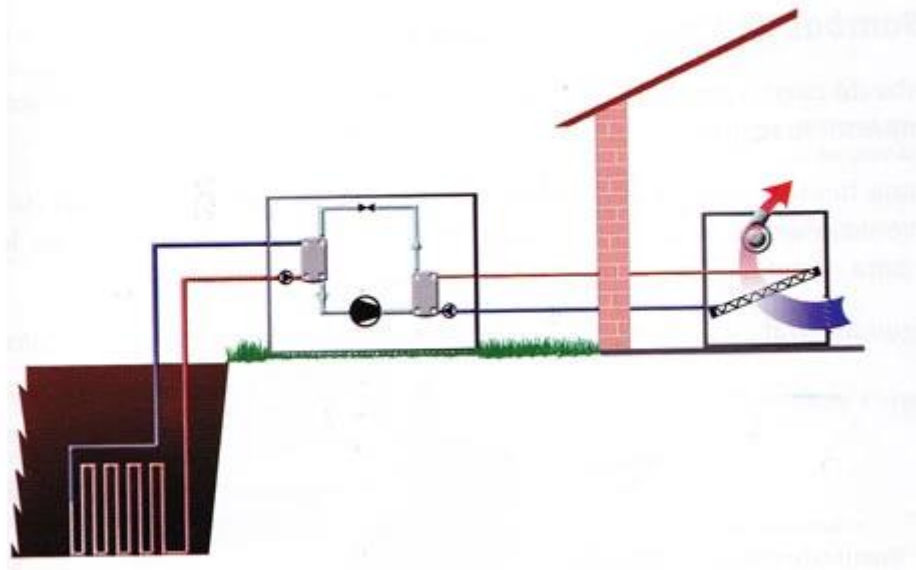


Figura 2-10 Bomba de calor geotérmica Fuente: [23]

- **Bomba de Calor Agua-Agua:** Las bombas de calor agua-agua extraen calor de una fuente de agua, como un lago, río, pozo o acuífero subterráneo, y lo transfieren al sistema de calefacción del edificio. Este tipo de bomba de calor se destaca por su alta eficiencia energética, principalmente debido a la estabilidad de la temperatura del agua subterránea durante todo el año. La temperatura constante del agua permite que la bomba de calor funcione de manera más eficiente en comparación con los sistemas que dependen del aire exterior, cuya temperatura puede variar significativamente.

2.4.3 Comparación de Sistemas

En cuanto a eficiencia energética, los sistemas agua-agua y especialmente las bombas de calor geotérmicas son generalmente más eficientes debido a la capacidad del agua para transportar calor de manera eficiente y la temperatura constante del suelo. Los sistemas aire-agua también son bastante eficientes, mientras que los sistemas aire-aire pueden ser menos eficientes en climas extremos.

En lo relativo a costos iniciales y de mantenimiento, los sistemas aire-aire y aire-agua suelen tener costos iniciales más bajos y una instalación más sencilla. Los sistemas agua-agua y aire-agua, en particular los geotérmicos, requieren una inversión inicial significativa y un mantenimiento más complejo, pero pueden ofrecer ahorros sustanciales a largo plazo en términos de consumo energético.

Por último, en lo relativo al montaje y la aplicación de estos, los sistemas aire-aire son ideales para aplicaciones residenciales y comerciales de pequeña escala debido a su fácil instalación y control individual. Los sistemas agua-agua y agua-aire son más adecuados para grandes edificios comerciales e industriales debido a su capacidad para manejar grandes cargas térmicas de manera eficiente.

2.5 Habitabilidad y climatización de aire

La habitabilidad es el conjunto de condiciones que hacen que un espacio sea adecuado y confortable para la ocupación humana. Incluye factores como la calidad del aire interior, el control de la temperatura, la humedad, la iluminación, la acústica y el diseño ergonómico del espacio. Todos estos elementos son fundamentales para garantizar que las personas puedan vivir, trabajar y desarrollar sus actividades diarias en un entorno seguro y cómodo.[24]

Una parte crucial de la habitabilidad está relacionada con los sistemas de climatización y tratamiento de aire. Estos sistemas son responsables de mantener condiciones óptimas dentro de los edificios, regulando la temperatura, filtrando contaminantes del aire y controlando la humedad. Esto no solo afecta el confort de los ocupantes, sino también su salud y bienestar general.

La calidad del aire interior es uno de los aspectos más importantes de la habitabilidad. Contaminantes como el polvo, los compuestos orgánicos volátiles y el dióxido de carbono pueden afectar la salud respiratoria y general de las personas. Los sistemas de climatización juegan un papel crucial al filtrar estos contaminantes y proporcionar un suministro constante de aire fresco y limpio.

El control de la temperatura es otro factor determinante. Mantener una temperatura interior confortable es esencial para el bienestar de los ocupantes. Los sistemas de climatización, como los mencionados anteriormente, permiten regular la temperatura de manera eficiente, adaptándose a las condiciones ambientales y las necesidades específicas del edificio y sus ocupantes.

La humedad es también un aspecto crítico de la habitabilidad. Niveles de humedad inadecuados pueden causar problemas de salud como sequedad de piel y ojos, así como promover el crecimiento de moho y hongos. Los sistemas de climatización y ventilación controlan la humedad relativa, manteniéndola dentro de rangos saludables para mejorar el confort y la salud de los ocupantes.

La iluminación, tanto natural como artificial, contribuye significativamente a la habitabilidad. Una iluminación adecuada no solo mejora la visibilidad y la seguridad, sino que también influye en el estado de ánimo y la productividad de las personas. Integrar sistemas de climatización con un diseño de iluminación eficiente puede optimizar aún más las condiciones habitables de un espacio.

La acústica y el diseño ergonómico del espacio complementan estos factores. El control del ruido y la disposición ergonómica de los muebles y espacios son clave para crear un entorno cómodo y funcional. Los sistemas de climatización deben diseñarse no solo para mantener condiciones ambientales ideales, sino también para minimizar el ruido y favorecer la interacción social y la productividad de los ocupantes.

La habitabilidad deficiente puede tener consecuencias negativas para la salud y el bienestar de los ocupantes, así como para la eficiencia operativa de los edificios. Problemas como el síndrome del edificio enfermo, causado por una mala calidad del aire interior, pueden afectar gravemente la salud de los ocupantes y reducir su productividad. [25], [26]

En definitiva, la optimización de los sistemas de climatización y tratamiento de aire es esencial para mejorar la habitabilidad de los edificios. Al implementar tecnologías avanzadas y estrategias de control eficientes, es posible crear entornos interiores que no solo sean confortables y saludables, sino también sostenibles desde el punto de vista energético y ambiental. Esto asegura que los espacios habitables cumplan con las necesidades y expectativas de sus ocupantes, promoviendo así un ambiente de trabajo y vida óptimo y satisfactorio. [24]

2.6 Características térmicas de los edificios

El comportamiento térmico de los edificios es un campo de estudio fundamental para entender cómo diversos factores influyen en la regulación de la temperatura y el confort interior. Desde la ubicación geográfica hasta los materiales de construcción y el diseño de las ventanas, cada elemento juega un papel crucial en la eficiencia energética y el bienestar de los ocupantes.[27]

2.6.1 Impacto de la Ubicación Geográfica

La ubicación geográfica de un edificio determina su exposición a las condiciones climáticas locales, incluyendo la cantidad de radiación solar recibida, la temperatura ambiental y la humedad. Edificios ubicados en climas cálidos deben diseñarse para minimizar la ganancia de calor solar en verano, mientras que aquellos en climas fríos deben maximizarla para reducir la necesidad de calefacción. La orientación

adecuada del edificio puede aprovechar la radiación solar en invierno y reducir la exposición al sol en verano, optimizando así el uso de energía.

2.6.2 Envolvente del edificio

La envolvente de un edificio es el término utilizado para describir todos los elementos que separan y protegen el interior del edificio del ambiente exterior. Esta incluye todos los componentes exteriores de la construcción que interactúan con el entorno, y su principal función es controlar el flujo de energía (calor, luz), aire y humedad entre el exterior y el interior del edificio.

2.6.2.1 Tipos de Materiales

Los tabiques y paredes pueden estar contruidos de una variedad de materiales, cada uno con propiedades térmicas distintas:

- Ladrillo: Material tradicional con buena inercia térmica, lo que permite almacenar y liberar calor lentamente.
- Hormigón: Similar al ladrillo en cuanto a inercia térmica, aunque su conductividad térmica puede ser mayor.
- Paneles de yeso: Ofrecen menor inercia térmica, pero pueden incorporar aislamiento adicional.
- Madera: Material con baja conductividad térmica y buena capacidad de aislamiento, aunque su uso puede estar limitado por consideraciones de resistencia al fuego.
- Materiales compuestos y modernos: Incluyen soluciones como paneles sándwich con núcleos aislantes, que combinan propiedades de aislamiento térmico y estructural.

2.6.2.2 Grosor y Diseño

El grosor de los tabiques y paredes es crucial para su comportamiento térmico. Paredes más gruesas generalmente tienen mayor inercia térmica, lo que ayuda a estabilizar la temperatura interior. Además, el diseño de capas múltiples, que incluye barreras de vapor y materiales aislantes, puede mejorar significativamente el rendimiento térmico.

2.6.2.3 Influencia en el Comportamiento Térmico

- Inercia térmica: La inercia térmica de un material se refiere a su capacidad para almacenar calor. Materiales con alta inercia térmica, como el ladrillo y el hormigón, ayudan a mantener una temperatura más constante en el interior del edificio, reduciendo las fluctuaciones térmicas diarias y mejorando el confort térmico.
- Conductividad térmica: La conductividad térmica es la capacidad de un material para conducir calor. Materiales con baja conductividad térmica, como el yeso o la madera, son más efectivos para minimizar las pérdidas de calor a través de las paredes. El uso de materiales con baja conductividad en combinación con aislamiento adicional puede resultar en paredes con excelentes propiedades térmicas.
- Aislamiento térmico: El aislamiento térmico es una técnica crucial para mejorar la eficiencia energética de un edificio. El uso de materiales aislantes dentro de los tabiques y paredes puede reducir significativamente las pérdidas de calor en invierno y mantener los espacios interiores frescos en verano. Materiales como la lana mineral, el poliestireno expandido (EPS) y el poliuretano son comunes en la construcción de tabiques y paredes con propiedades aislantes mejoradas.
- Puentes térmicos: Los puentes térmicos son áreas donde el calor se transfiere más fácilmente a través de la envolvente del edificio, generalmente debido a discontinuidades en el aislamiento. Los tabiques y paredes deben diseñarse para minimizar estos puentes térmicos, utilizando

técnicas como la continuidad del aislamiento y la reducción de materiales con alta conductividad térmica en los puntos de unión.

2.6.2.4 Ventanas y su Efecto en el Comportamiento Térmico

Las ventanas son puntos críticos en la envolvente del edificio debido a su impacto en la ganancia y pérdida de calor. Las propiedades como el coeficiente de transmisión térmica (U-value), el factor solar y el coeficiente de sombreado determinan cuánta energía solar entra al interior y cuánto calor se pierde hacia el exterior. En climas cálidos, ventanas con baja ganancia térmica reducen la ganancia de calor no deseada, mientras que, en climas fríos, ventanas con alta ganancia térmica pueden aprovechar la energía solar para reducir la carga de calefacción. El uso de doble o triple acristalamiento y marcos con rotura de puente térmico mejora el aislamiento térmico, reduciendo pérdidas de calor y mejorando el confort interior.

2.6.3 Uso y Comportamiento Térmico

El comportamiento térmico también depende del uso y la operación del edificio. Estrategias como la gestión eficiente de la energía, el control de la temperatura interior, y la maximización del uso de luz natural versus artificial pueden influir en el consumo energético y el confort térmico de los ocupantes. La implementación de técnicas pasivas como la ventilación natural y el diseño de sombreado puede reducir la necesidad de refrigeración mecánica en verano, mientras que prácticas ocupacionales como ajustar la temperatura según la ocupación y las actividades pueden optimizar el uso de energía sin comprometer el confort.

El estudio del comportamiento térmico de los edificios es esencial para diseñar espacios habitables y energéticamente eficientes. La integración de elementos como la ubicación geográfica, los materiales de construcción, las ventanas y las prácticas de uso permite maximizar el confort térmico y minimizar el consumo energético. Comprender cómo estos factores interactúan facilita el diseño de edificaciones sostenibles y confortables, adaptadas a las necesidades climáticas y ambientales específicas de cada región. [27], [28]

2.7 Emisiones en sistemas de climatización

Los sistemas de climatización desempeñan un papel crucial en la regulación de la temperatura y la calidad del aire interior en edificios residenciales, comerciales e industriales. Sin embargo, es importante reconocer que también pueden ser fuentes significativas de emisiones de elementos nocivos que afectan tanto la salud humana como el medio ambiente.[29]

2.7.1 Compuestos Orgánicos Volátiles

Los Compuestos Orgánicos Volátiles son una clase de contaminantes que se liberan principalmente durante el proceso de evaporación de productos químicos orgánicos. En el contexto de los sistemas de climatización, los COV pueden provenir de productos de limpieza, desinfectantes, materiales de construcción y revestimientos utilizados en el entorno interior. Ejemplos comunes incluyen formaldehído, benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos. Estos compuestos pueden evaporarse fácilmente a temperatura ambiente y contribuir a la mala calidad del aire interior, causando irritación de ojos, nariz y garganta, así como problemas respiratorios a largo plazo.

2.7.2 Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Los óxidos de nitrógeno, especialmente el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), son contaminantes gaseosos generados durante la combustión a alta temperatura en los sistemas de climatización que utilizan combustibles fósiles como gas natural, diésel o fuel oil. Estos gases pueden

penetrar en el sistema respiratorio humano y causar irritación de las vías respiratorias, exacerbación de enfermedades respiratorias crónicas como el asma, y afectar la función pulmonar. Además, contribuyen a la formación de ozono troposférico y partículas finas, que son perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente.

2.7.3 Partículas en Suspensión

Las partículas en suspensión, también conocidas como material particulado, son pequeñas partículas sólidas o líquidas que se encuentran en el aire. Estas partículas pueden variar en tamaño y composición, desde polvo y polen hasta materiales derivados de la combustión de combustibles fósiles. En los sistemas de climatización, las partículas en suspensión pueden ser generadas por el desgaste de los componentes mecánicos, la entrada de polvo exterior o la falta de mantenimiento adecuado de los filtros de aire. Las partículas finas, especialmente aquellas con un diámetro aerodinámico inferior a 2.5 micrómetros, pueden penetrar profundamente en los pulmones y causar una serie de problemas de salud, como enfermedades respiratorias y cardiovasculares, e incluso contribuir a la mortalidad prematura.

2.7.4 Gases de Efecto Invernadero

Además de los contaminantes locales, los sistemas de climatización también pueden ser fuentes de gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global. El dióxido de carbono (CO₂) es el gas de efecto invernadero más común asociado con los sistemas de climatización, especialmente aquellos que dependen de combustibles fósiles para la generación de energía. A medida que estos sistemas operan y consumen energía, liberan CO₂ a la atmósfera, contribuyendo al cambio climático y sus efectos adversos en los patrones climáticos, los ecosistemas y la biodiversidad.

2.7.5 Impacto en la Salud y el Medio Ambiente

Las emisiones de elementos nocivos por sistemas de climatización tienen impactos significativos en la salud humana y el medio ambiente. A nivel local, pueden deteriorar la calidad del aire interior, afectando la salud de los ocupantes del edificio y exacerbando condiciones respiratorias preexistentes. A nivel global, contribuyen a la contaminación atmosférica y al cambio climático, afectando la calidad del aire exterior y exacerbando problemas ambientales como la pérdida de biodiversidad y la acidificación de los océanos.

2.7.6 Estrategias de Mitigación y Control

Para mitigar las emisiones de elementos nocivos, es esencial implementar estrategias de control y tecnologías avanzadas en los sistemas de climatización. Esto incluye:

- **Uso de Tecnologías de Filtración Avanzada:** Implementar filtros de aire de alta eficiencia y sistemas de filtración avanzados que capturen partículas finas y contaminantes gaseosos antes de ser liberados al ambiente interior.
- **Optimización de Combustibles y Procesos:** Promover el uso de combustibles limpios y tecnologías de combustión más eficientes que reduzcan las emisiones de COV, NO_x y GEI durante la operación de los sistemas de climatización.
- **Mantenimiento Regular:** Realizar mantenimiento preventivo regular de los equipos, incluyendo la limpieza y reemplazo periódico de filtros de aire, para garantizar un funcionamiento eficiente y reducir las emisiones no deseadas.
- **Educación y Concienciación:** Sensibilizar a los usuarios y operadores sobre la importancia de mantener sistemas de climatización limpios y eficientes, así como promover prácticas de gestión energética sostenible que minimicen el impacto ambiental.[29] [30]

2.8 Simulación de sistemas de climatización

La simulación de sistemas de climatización de aire juega un papel crucial en la ingeniería de edificaciones y el diseño de sistemas HVAC. Este enfoque permite a los ingenieros y diseñadores prever

y evaluar el rendimiento de los sistemas de climatización antes de su implementación física, optimizando así el diseño y la eficiencia energética de los edificios.

2.8.1 Importancia y Aplicaciones de la Simulación

La simulación computacional permite modelar y analizar el comportamiento térmico, la distribución del flujo de aire, y otros aspectos clave del funcionamiento de los sistemas HVAC en diferentes escenarios y condiciones climáticas. Esto es especialmente relevante para edificaciones de gran escala, donde el diseño óptimo del sistema de climatización puede influir significativamente en el confort de los ocupantes y en el consumo energético a lo largo de la vida útil del edificio.

2.8.2 Métodos y Herramientas de Simulación

Existen diversas herramientas y programas de simulación disponibles, como EnergyPlus, eQuest, y TRNSYS, que permiten a los ingenieros modelar virtualmente el comportamiento de los sistemas de climatización. Estas herramientas utilizan datos climáticos, características del edificio, especificaciones de los equipos HVAC, y estrategias de control para simular el rendimiento energético y térmico del edificio bajo diferentes escenarios operativos.

2.8.3 Beneficios y Resultados

Los beneficios de la simulación de sistemas de climatización incluyen la capacidad de evaluar la eficiencia energética del diseño propuesto, identificar áreas de mejora en la distribución del aire y la gestión térmica, así como optimizar el tamaño y la capacidad de los equipos HVAC. Además, permite realizar análisis de costo-efectividad y comparar diferentes estrategias de diseño antes de la implementación física, lo que puede resultar en ahorros significativos tanto en costos de operación como en emisiones de carbono.

2.8.4 Desafíos y Consideraciones

Sin embargo, la simulación de sistemas HVAC no está exenta de desafíos. Requiere datos precisos y detallados del edificio y su entorno, así como una comprensión profunda de los principios de ingeniería térmica y fluidodinámica. Además, los resultados de la simulación deben ser validados mediante pruebas y mediciones en el mundo real para garantizar la precisión y fiabilidad del modelo.

2.8.5 Futuras Direcciones y Tendencias

En el futuro, se espera que la simulación de sistemas de climatización evolucione hacia modelos más precisos y sofisticados, integrando inteligencia artificial y machine learning para optimizar el control y la gestión de los sistemas HVAC en tiempo real. Además, la simulación podría jugar un papel crucial en la adaptación de edificaciones existentes a los desafíos del cambio climático y en la implementación de estrategias de construcción sostenible.[31]

3 DESARROLLO

3.1 Descripción del apartado

En este apartado se explicará de qué manera se ha desarrollado el trabajo fin de grado, empezando por la información recabada, el análisis de dicha información y el proceso de desarrollo de la simulación para llegar a los resultados requeridos.

3.2 El edificio del CUD-ENM

El edificio en el que se va a realizar la simulación térmica en este proyecto es el actual emplazamiento del Centro Universitario de la Defensa, ubicado dentro de la Escuela Naval Militar en Marín, Pontevedra. Este edificio forma parte del conjunto conocido como el “Patio de Aulas” de la ENM.

El edificio se divide en dos plantas principales, organizadas con despachos y seminarios a ambos lados de un pasillo central. En la primera planta se encuentran la dirección y administración del centro, así como la mayoría de los despachos de los profesores. En la planta baja se ubican principalmente despachos del profesorado, con alguna estancia utilizada como seminario.

Los seminarios de la planta baja están destinados a clases para los alumnos de la Escuela Naval. Cada clase tiene una capacidad de entre diez y doce alumnos. En la zona oeste de esta planta se encuentran despachos de profesores del Centro Universitario de la Defensa y una sala específica para uso docente. Esta planta será el entorno en el cual se llevará a cabo nuestro trabajo.

3.2.1 Características constructivas del edificio del CUD-ENM

Una vez ubicado el entorno a estudiar, pasamos a estudiar en detalle la planta baja mencionada. Esta zona comprende un pasillo central, con dos zonas de despachos a cada lado del pasillo. Dichas zonas se dividen verticalmente a su vez en dos espacios; en la zona inferior, el pasillo y los despachos en cuestión, y en las zonas superiores, tres plenums (17172.4.2.2). Las zonas de despachos, por su parte, tienen ventanas repartidas a lo largo de las fachadas exteriores. La distribución se observa de manera sencilla en la Figura 3-1. Las dimensiones y características de dicha planta, como planta, alzado y perfil, y composición de los distintos cerramientos y paredes, vienen reflejadas en el plano del edificio del CUD, del cual podemos extraer toda la información necesaria para reproducir el edificio en nuestro entorno virtual. [32]

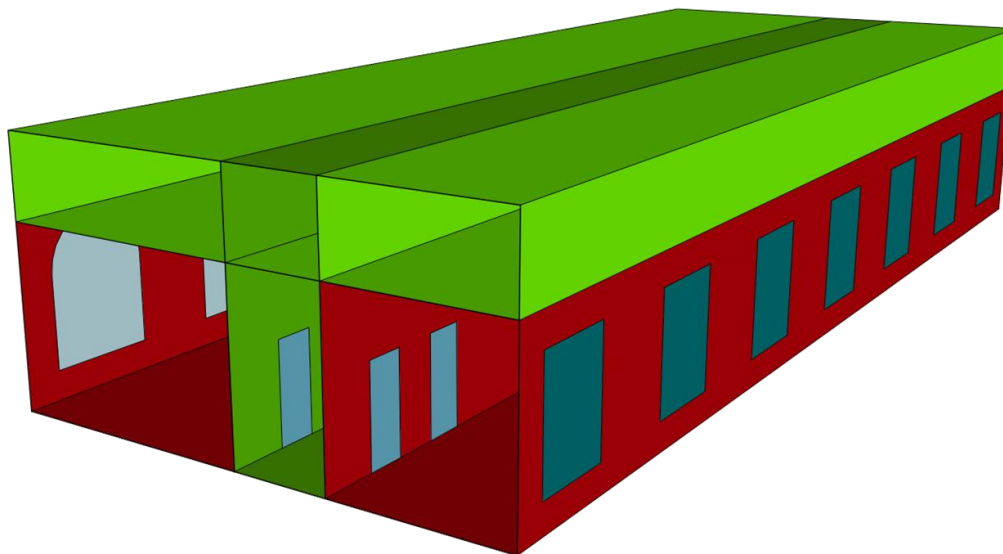


Figura 3-1 Distribución de los espacios en la planta baja del CUD-ENM

3.2.1.1 Tabique y fachadas

El primer paso para poder realizar la simulación será reproducir las distintas zonas, con las características constructivas de cada una, comenzando por los tabiques y fachadas que separan los distintos espacios. La separación entre el pasillo y los espacios adyacentes se materializa mediante tabiques de la marca Pladur de 130 mm de grosor (Figura 3-2), simétricos respecto a su centro, que ascienden hasta el forjado de la planta superior, siendo el tabique el mismo para las estancias y la zona por encima del falso techo. El tabique está formado por dos planchas de 15 mm de yeso laminar, una plancha de 70 mm de grosor de aislamiento de lana de roca, y otras dos planchas de 15 mm de yeso laminar. En la plancha de lana de roca, encontramos perfiles metálicos omega de 70 mm que transcurren en sentido vertical, con una separación de 600 mm entre ellos. Este conjunto proporciona una resistencia térmica de $2,30 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. [33]

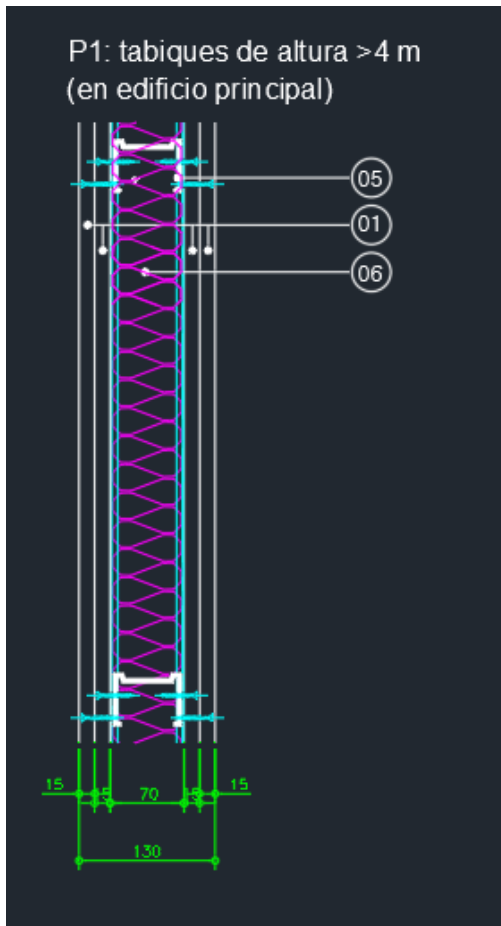


Figura 3-2 Tabique interior del CUD Fuente: [32]

Leyenda	Material
01	Placa de yeso laminar de 15 mm
04	Perfil metálico omega de 15 mm
05	Perfil metálico omega de 70 mm
06	Aislamiento de lana de roca
07	Cámara de aire

Tabla 3-1 Leyenda para el tabiques y fachadas del interior del edificio del CUD Fuente: [32]

Pasando ahora a la fachada exterior (Figura 3-3), está construida en ladrillo hueco. En la capa exterior, se le ha aplicado una capa de mortero y posteriormente, una capa de pintura. En la zona interior, encontramos en primer lugar una cámara de aire de 15 mm de ancho, tras lo cual se ha colocado otro tabique pladur, de menor grosor. Está compuesto de una plancha de aislante de lana de roca, de 45 mm de ancho, y una única placa de yeso laminar de 15 mm. Al igual que en el anterior tabique, también nos encontramos con dos perfiles metálicos omega, en este caso de 45 mm, con el mismo intervalo entre ellos de 600 mm. Este tabique tiene una resistencia térmica de $3,16 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

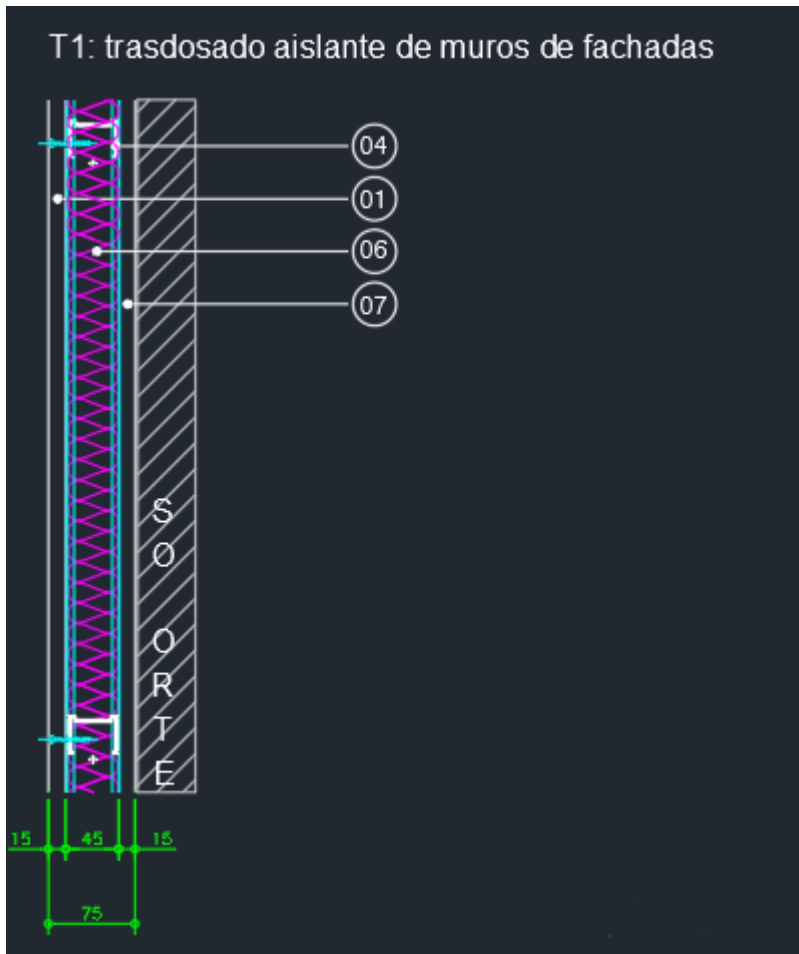


Figura 3-3 Aislante muros de fachada Fuente: [32]

3.2.1.2 Ventanas

Ambas fachadas exteriores están dotadas de ventanas. Sin embargo, no son todas de la misma forma. En la fachada norte, las ventanas tienen unas dimensiones de 185 mm de ancho y 305 mm de alto, si bien los 60 mm superiores están destinados a una entrada de aire, dejando el alto efectivo de la ventana en 245 mm. En la cara sur, las ventanas tienen dos partes diferenciadas. La inferior es rectangular, con unas dimensiones de 225 mm de ancho y 190 mm de alto. Inmediatamente encima y en el mismo marco, se encuentra una ventana semicircular de 112 mm de radio, como se observa en la siguiente figura. Ambas se encuentran reflejadas en la Figura 3-4.

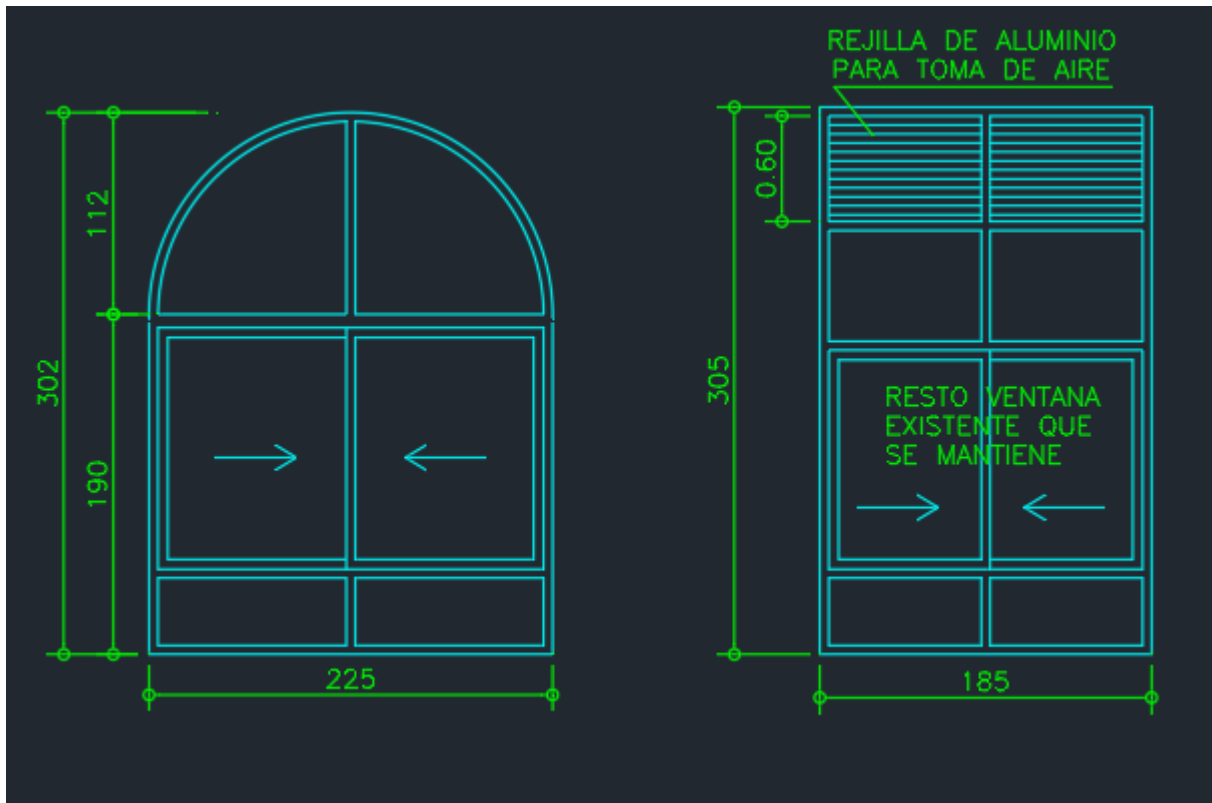


Figura 3-4 Dimensiones de las ventanas Fuente: [32]

Las ventanas, según viene reflejado en los planos del edificio, son de doble acristalamiento de vidrio climalit 4-6-4. El doble acristalamiento consiste en dos hojas de cristal separadas entre sí por una cámara de aire sellada. Esta estructura le proporciona una baja conductividad térmica, lo cual lo hace ideal para ventanas exteriores, ya que permite mantener la energía en el interior en estaciones frías e impedir la transferencia de calor hacia el interior en estaciones cálidas. [34]

Las dimensiones del cristal vienen dadas por su nomenclatura. El primer y último dígito nos dan las dimensiones de las hojas de cristal, y el segundo dígito nos da las dimensiones de la cámara de aire entre ellas. El fabricante, además, proporciona las propiedades de cada ventana, estableciéndose una resistencia térmica de $0,42 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. [34]

3.2.1.3 Techos y suelos

Respecto a la estructura del edificio, solo queda por determinar la composición de los materiales de las superficies horizontales, que son 3; el pavimento, el falso techo y el techo que separa ambas plantas.

Comenzando por el pavimento, encontramos tres capas diferenciadas. La primera es la cimentación utilizada para sustentar el edificio. En este caso, se ha designado una sustentación de arena y grava con el objetivo de que nos proporcionen propiedades térmicas apropiadas para realizar nuestro estudio. Inmediatamente encima de esta cimentación, se encuentra una solera de hormigón de 30 cm de grosor, con un mallazo de 4 mm. La capa superior del pavimento viene dada por una superficie continua de mármol rojo, de 2 mm de grosor, para toda la planta.

El falso techo, que se encuentra a 3,7 metros de altura, está materializado por paneles de aluminio perforado, de forma cuadrada. Estos paneles permiten que el aire transcurra de los despachos a los plenums, a través de las perforaciones mencionadas.

Por último, el techo que separa ambas plantas se construye mediante un forjado unidireccional en sentido longitudinal, apoyado en una serie de parejas de vigas IPE-550, separadas 1 metro entre sí y 2,6

metros entre las distintas parejas. Encima del forjado, la superficie continua es de mármol rojo, al igual que el suelo de la planta baja.

3.2.2 El sistema de climatización del CUD-ENM

El sistema de climatización de la planta baja del CUD comienza con una UTA, que recoge aire del exterior del edificio, realizando un pretratamiento térmico, para posteriormente distribuir el aire a través de los distintos conductos a los plenums mencionados anteriormente. En el caso del pasillo, el aire se proyecta de manera directa sobre el mismo, a través de los difusores de techo que se encuentran repartidos a lo largo del mismo. En el caso de las zonas de despachos, el caudal proveniente de la UTA se vuelca sobre el plenum a través de distintas aperturas en los conductos. Los fancoils, repartidos a lo largo de las dos zonas de despachos, de tal forma que en todos los despachos exista al menos uno, recogen aire de los plenums para realizar un tratamiento térmico, y proyectar el caudal saliente sobre los distintos despachos. Los tratamientos térmicos se realizan mediante una bomba de calor aire-agua, que envía un caudal de agua a los distintos elementos del edificio, y que puede actuar en modo calentamiento o refrigeración, ajustándose el modo en la propia bomba en función de la época del año.

En total, existen un total de 9 fancoils tipo FCX-P 22 y un fancoil FCX-P 42 para la zona norte, y 11 fancoils FCX-P 42 en la zona sur. Las características de dichos fancoils vienen recogidas en su ficha técnica, sin embargo, en la siguiente figura se recogen los aspectos más relevantes para nuestro estudio. [32], [35]

Parámetro	FCX-P 22	FCX-P 24
Caudal de agua calentamiento máx (l/h)	292	636
Caudal de agua enfriamiento máx (l/h)	258	585
Caudal de aire máx (m ³ /h)	290	600
Caudal de aire mín (m ³ /h)	140	330
Potencia máx motor (W)	25	57

Tabla 3-2 Parámetros de los Fancoils Fuente: [35]

En primer lugar, debemos comprobar que los fancoils proporcionan suficiente caudal para estar dentro de los márgenes establecidos por el RITE. Dada la planta baja como una superficie de 530 m², el RITE nos indica que debemos tener un caudal de entrada de 1580 m³/h de entrada en el entorno (por los requisitos indicados en el apartado 2.2. Sumando todos los fancoils de la planta baja en su mínimo caudal, nos resulta un caudal total de 5220 m³/h, por lo que con todos los fancoils en funcionamiento, estaríamos dentro de los márgenes del RITE. Por otra parte, los despachos tienen una superficie de 24,5 m², por lo que, aplicando el mismo criterio, el requerimiento de caudal de aire de entrada será de 73,2 m³/h. Siendo el caudal mínimo proporcionado por los fancoils de 140 m³/h, también nos encontramos dentro de los límites establecidos.

Estos fancoils se encuentran distribuidos a través de todo el falso techo, de tal forma que la distribución de aire sea prácticamente igual en los distintos despachos. Debido a la diferencia de presiones generada por la impulsión de aire en sentido descendente, el aire transcurre a través de las perforaciones del falso techo, de tal forma que una fracción del aire que entran en el fancoil proviene de la UTA, mientras que el resto es aire que ha ascendido a través del falso techo perforado. En los pasillos no se da este suceso, al no existir fancoils.

El último elemento por mencionar es la bomba de calor. Se trata de una bomba de calor aire-agua reversible, un sistema avanzado que no solo puede transferir calor del aire exterior a un sistema de calentamiento de agua, sino que también puede funcionar en sentido inverso, extrayendo calor del interior y liberándolo al exterior, proporcionando así tanto calefacción en invierno como refrigeración

en verano. El funcionamiento de una bomba de calor aire-agua reversible se basa en los mismos principios de la termodinámica y el ciclo de refrigeración inverso que las bombas de calor convencionales, pero con la capacidad adicional de invertir su ciclo. En la siguiente figura, se muestra el esquema del sistema de climatización, con todos sus componentes. Las líneas discontinuas reflejan caudales de agua, mientras que las continuas reflejan caudales de aire.

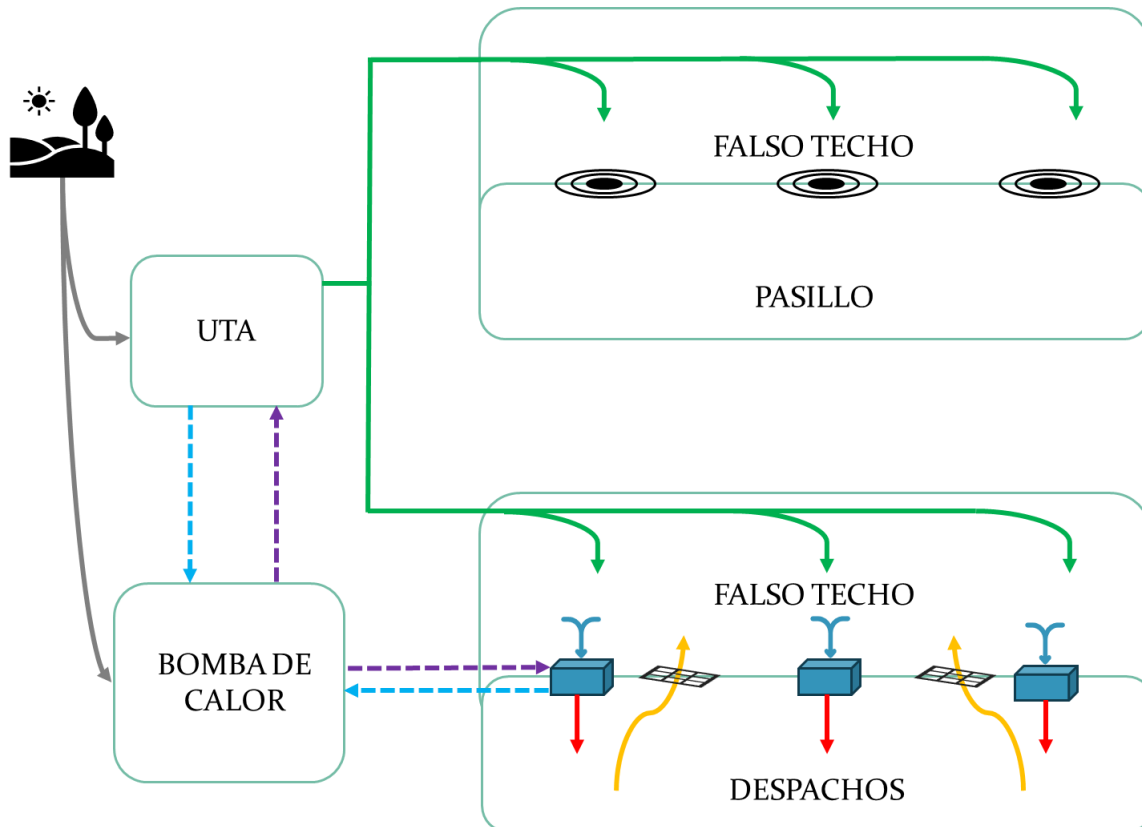


Figura 3-5 Sistema de climatización del CUD

Es importante establecer que el propósito de la bomba de calor de manera general, a diferencia del de la UTA, es realizar un tratamiento térmico sobre un fluido utilizando otro para extraer o aportarle energía, mientras que en la UTA el objetivo es realizar la impulsión de un fluido desde una entrada a una salida, de tal forma que en la salida se encuentre en unos valores determinados de temperatura, humedad, etc. Dada su naturaleza particular, a continuación, se explica su funcionamiento. [1], [22]

3.2.2.1 Funcionamiento en Modo Calentamiento

En modo calentamiento, la bomba de calor aire-agua reversible opera de igual manera que una bomba de calor aire-agua convencional; el ciclo comienza en el evaporador, donde un refrigerante líquido absorbe calor del aire exterior, evaporándose y convirtiéndose en gas. El refrigerante en estado gaseoso es entonces comprimido por el compresor, lo que aumenta su presión y temperatura. Este gas caliente y a alta presión se desplaza al condensador, donde cede su calor al agua del sistema de calentamiento. A medida que el refrigerante cede calor, se condensa y vuelve a su estado líquido. Finalmente, el refrigerante líquido pasa a través de una válvula de expansión, donde su presión y temperatura disminuyen antes de regresar al evaporador, completando así el ciclo.

3.2.2.2 Funcionamiento en Modo Refrigeración

En modo refrigeración, el ciclo se invierte mediante una válvula de inversión, permitiendo que el evaporador y el condensador intercambien funciones. El refrigerante absorbe el calor del agua del sistema (ahora actuando como evaporador), lo que enfría el agua que circula por el sistema de

refrigeración del edificio. El refrigerante calentado pasa al compresor, donde es comprimido y su temperatura aumenta aún más. Este refrigerante caliente y a alta presión se desplaza al componente que ahora actúa como condensador, donde cede su calor al aire exterior. Finalmente, el refrigerante se expande y enfría a través de la válvula de expansión antes de regresar al evaporador para continuar el ciclo. Este ciclo se puede seguir en sentido en la Figura 3-6.

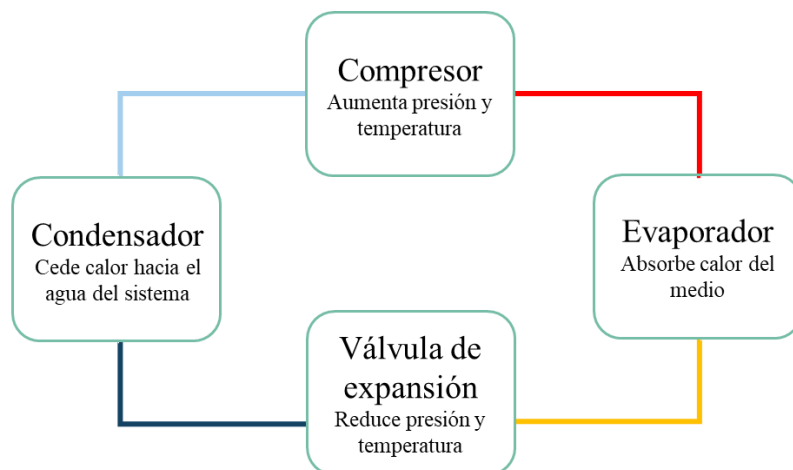


Figura 3-6: Bomba de calor en enfriamiento

3.2.2.3 Eficiencia y Coeficiente de Rendimiento (COP)

El Coeficiente de Rendimiento (COP) es una medida clave de la eficiencia de la bomba de calor, definido como la cantidad de calor transferido al sistema de calentamiento o refrigeración por unidad de energía eléctrica consumida. En modo calentamiento, un COP típico para bombas de calor aire-agua puede variar entre 3 y 4, mientras que en modo refrigeración, la eficiencia se mide mediante el EER (Energy Efficiency Ratio).

3.2.2.4 Ventajas y Desventajas

Las bombas de calor aire-agua reversibles ofrecen varias ventajas significativas. Su alta eficiencia energética se traduce en menores costos operativos, y la capacidad de proporcionar tanto calentamiento como refrigeración las hace extremadamente versátiles. Además, utilizan una fuente de energía renovable, el aire exterior. Sin embargo, su eficiencia puede disminuir en climas extremadamente fríos y su coste inicial de instalación puede ser mayor en comparación con sistemas tradicionales de calentamiento y refrigeración.[1], [22]

3.3 Preparación del modelado del edificio

3.3.1 Modelado en Sketchup

Una vez hemos identificado los elementos que queremos estudiar, debemos pasar a representarlos, con la mayor precisión posible, en nuestro modelo informático. Esto se realizará a través del programa Sketchup. Sketchup es un software especialmente concebido para construir, modificar y compilar, imágenes y proyectos en 3D. Es un programa sencillo de utilizar, sin embargo, no quiere decir que no se puedan realizar proyectos complejos con el adecuado conocimiento del programa. Este programa nos permitirá realizar el modelado del edificio del CUD y establecer distintas zonas térmicas, que se corresponderán con las seis zonas que se vienen tratando en este apartado.

En Sketchup realizaremos únicamente el modelado físico, es decir, las superficies con sus medidas indicadas, incluyendo ventanas y puertas, y las diferentes zonas térmicas del mismo.

Para la realización de este trabajo, nos hemos centrado en la planta baja del edificio del CUD, que dividiremos en seis espacios; el pasillo central, las dos zonas adyacentes de despachos, y sus respectivas zonas superiores, por encima del falso techo. Por tanto, la primera parte del proceso de modelado consistirá en ir realizando las diferentes zonas térmicas, con sus correspondientes medidas extraídas de los planos del CUD. [32]

Esta primera parte se realizará creando primero una zona, dibujando posteriormente en dicha zona la sección pertinente (despacho, pasillo o plénium), y seguidamente creando las zonas térmicas adyacentes en los vértices de la sección ya creada. Por último, debemos asignar los nombres a las superficies, en función de su composición:

- EXT_WALL para las fachadas exteriores
- ADJ_WALL para tabiques interiores
- GROUND_FLOOR para el suelo de la planta baja
- BND_CEILING para el falso techo
- EXT_ROOF para el techo que divide ambas plantas

En las fachadas exteriores colocaremos las ventanas según vienen en el plano, nombrándolas EXT_WINDOW1. Por tanto, el resultado será el que vemos en la figura siguiente.

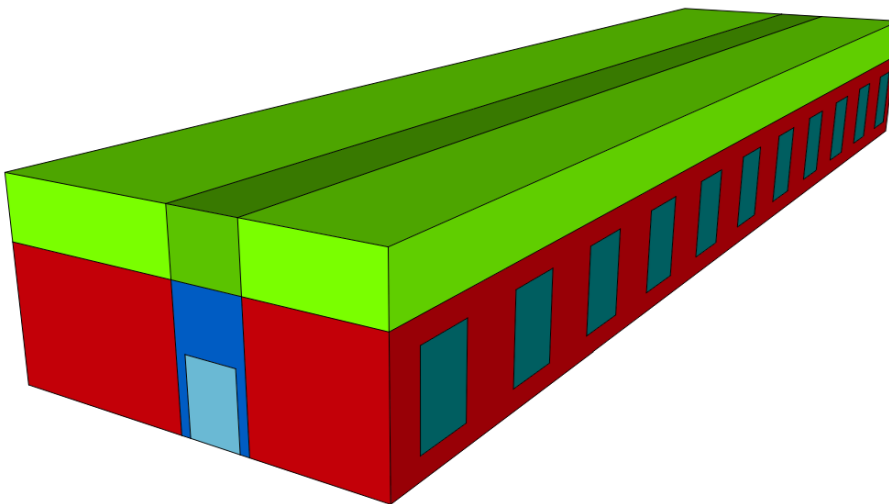


Figura 3-7 Modelo de la planta baja del CUD, visto desde el S

Cada una de las zonas que se observan es una de las diferentes zonas térmicas que utilizaremos en la simulación posterior. Se pueden observar las dos zonas de despachos en rojo, el pasillo interior en azul, y los falsos techos en la zona superior, en verde. Debido a requerimientos para la asociación de archivos entre los distintos programas, los nombres de las zonas vienen dados por una combinación aleatoria de letras y números que proporciona el programa, ya que al cambiar el nombre de la zona en la interfaz de Sketchup, la vinculación entre el archivo del programa, y el relacionado que posteriormente utilizaremos para exportar a TRNSYS se pierde. No obstante, en la tabla a continuación se relaciona cada nombre con su zona correspondiente.

Nombre	Zona
AD20A3	DESPACHOS ZONA SUR
904DA6	PASILLO CENTRAL
2E0FB1	DESPACHOS ZONA N

93F6FD	PLÉNUM DESPACHOS S
D98C51	PLÉNUM PASILLO
108BDD	PLÉNUM DESPACHOS N

Tabla 3-3 Espacios en Sketchup

Una vez terminado el modelado del edificio, el resultado es de 6 zonas térmicas, con 36 superficies totales y 22 ventanas. Una vez llegado a este punto, pasamos a la caracterización de las distintas zonas y superficies en TRNSYS. Para ello, utilizaremos la extensión TRNBUILD que incorpora el programa.

3.3.2 Caracterización del edificio

TRNBUILD es una extensión del programa TRNSYS, que será el que utilizemos para realizar la simulación de las propiedades del edificio. TRNSYS es un programa utilizado para simular el comportamiento de sistemas transitorios. Si bien es fundamentalmente utilizado para evaluar el comportamiento de sistemas de energía térmicos y eléctricos, también se puede utilizar para simular otros procesos, como sistemas biológicos. En concreto, TRNBUILD nos permite configurar las distintas características de aquel entorno sobre el que vamos a realizar la simulación, en nuestro caso, la planta baja del CUD. Por tanto, en esta parte le daremos a las distintas superficies y zonas creadas previamente las características apropiadas, para poder proceder posteriormente con la simulación.

Una vez que entramos en el programa TRNBUILD, vemos como nos aparece un menú desplegable. En este menú se muestran las distintas zonas y superficies que hemos creado en el archivo de Sketchup, pudiendo editar su composición y características.

En primer lugar, hay que dar las características físicas a las distintas superficies, acorde a su composición en la realidad. Para ello, iremos extrayendo de la biblioteca de materiales de TRNBUILD los materiales necesarios en función de la información extraída de los planos del edificio, de tal forma que su composición sea la misma que en el edificio real.

Comenzaremos con la fachada exterior, a la que nombraremos EXTERNAL_WALLS. Dicha fachada está compuesta por varias capas. En primer lugar, colocaremos una capa de mortero, a la que añadiremos una de ladrillo hueco, una plancha de lana mineral y una placa de yeso. La capa de pintura, al no tener un gran efecto sobre el comportamiento térmico del edificio, no se ha incluido, al igual que las vigas, por la misma razón. Al ir colocando cada capa, el programa nos pide que indiquemos un grosor para la misma. Una vez indicado, calcula de manera autónoma la conductividad térmica del conjunto. Los grosores de las distintas capas están dispuestos conforme a lo indicado en el apartado 3.2.1.1.

Seguidamente, diseñaremos la capa de tabique interno, que denominaremos INTERNAL_WALLS. Podemos obviar las vigas que explicábamos en el apartado 3.2.1.1, ya que no afectan de manera apreciable al comportamiento térmico de la misma. Por tanto, los componentes serán dos capas de placa de yeso de 30 mm (que tendrán el mismo comportamiento que dos capas de 15 mm) y una entre ellas de lana mineral.

A continuación, encontramos el falso techo (nombrado como FALSO_TECHO). Esta superficie es ligeramente distinta a las demás, ya que, en beneficio de los parámetros de simulación térmica, se ha designado como capa sin masa. Esto permite aproximar a nivel térmico (aunque no respecto al flujo de aire, esto se tratará posteriormente) el comportamiento de un falso techo perforado real.

Pasando a la superficie inferior (SUELO), en este caso nos encontramos ante el problema de designar una profundidad a la capa inferior, es decir, aquello sobre lo que se sustenta la capa de hormigón. Colocando una capa proporcionada por la librería como cimiento, y dándole una profundidad de 0.65 metros, podemos simular con bastante exactitud el comportamiento real de la cimentación del edificio. A continuación, colocamos el hormigón y el suelo de mármol que encontramos en la planta baja.

La última superficie (a excepción de las ventanas, que se diseñan con un método distinto) es el forjado superior, designado como FORJADO_PLANTA_SUPERIOR. Afortunadamente, TRNBUILD ofrece numerosos forjados en su librería, por lo que simplemente debemos darle el grosor indicado (20 mm) y colocar encima el mismo mármol que encontrábamos en el suelo.

El diseño de las ventanas, en cambio, se realiza de manera distinta. La interfaz de diseño de ventanas en TRNBUILD no permite alterar parámetros de las distintas ventanas de la librería. Para remediar este efecto, se ha optado por escoger una ventana ya existente, de características prácticamente idénticas en el ámbito de la transferencia de calor, si bien no se trata de un cristal 4.6.4, sino de una superficie única de 6 mm de grosor.

Una vez terminadas las distintas superficies del edificio, comenzamos con la ventilación hacia las zonas. Será necesario implementar una por cada plenum por encima de los despachos y otra para el caudal de la UTA que transcurre directamente al pasillo central. Cabe aclarar que en este momento simplemente estamos creando diferentes caudales que se introducen en las zonas, ya que las características de los distintos elementos del sistema de climatización las implementaremos en la propia interfaz de TRNSYS, cuando creamos el modelo de nuestro sistema de climatización. Por tanto, en este paso únicamente se han creado una serie de caudales que entran en las distintas zonas térmicas, como se refleja en la tabla a continuación, para posteriormente relacionar cada variable con el componente del que proviene, esto es, los caudales de entrada a las zonas térmicas serán los salientes de los fancoils y la UTA, las temperaturas serán la de estos mismos caudales, y así con el resto de las variables.

PARÁMETRO	VARIABLE
Caudal de salida en la UTA	CAUDAL_UTA
Caudal de salida en fancoil N	FANC_N
Caudal de salida en fancoil S	FANC_S
Temperatura de salida en UTA	TEMP_UTA
Temperatura de salida en fancoil N	TEMP_N
Temperatura de salida en fancoil S	TEMP_S

Tabla 3-4 Variables del sistema

En lo relativo a las pérdidas, se utilizan tanto para pasillo como para los despachos, la función de pérdidas de una oficina relativa a personas, que ya viene proporcionada por la librería de pérdidas y ganancias del programa, así como las ganancias térmicas proporcionadas por la iluminación para una zona de oficinas, también proporcionada por el programa. Si bien existen numerosas opciones para ambos casos, las seleccionadas se calculan respecto a la superficie de referencia. Esta opción es sencilla de implementar y no requiere de mayores cálculos ni interpretaciones.

Por último, encontramos las distintas zonas térmicas, sobre las que debemos aplicar todas las variables y datos generados en este paso. Si bien, no es menester explicar de nuevo todo el proceso, ya que se ha indicado la composición de las zonas y que régimen actúa sobre las mismas, si se debe indicar que aquí se designan las condiciones de inicio de las zonas térmicas, las cuales se han establecido como 20°C y 20% de humedad para las zonas inferiores y 18°C y 30% de humedad para los distintos plenums.

Una vez realizado todo este proceso, estamos en disposición de comenzar a trabajar en la simulación en TRNSYS.

3.3.3 Preparación de la simulación

La simulación en TRNSYS está dotada de distintos elementos, muchos de los cuales ya se han mencionado en distintas partes de esta memoria. A continuación, se explicarán aquellos relevantes para el proyecto, el proceso de preparación y la relación entre los mismos. Los elementos de TRNSYS se denominan “type” y un número para cada uno.

En primer lugar, al abrir la interfaz nos encontramos con el type 56, que es nuestro edificio implementado en el programa. Este type interpreta el archivo que hemos generado en el apartado 3.3.2, de tal forma que podemos tener ambos archivos abiertos, y se realizamos cambios en el archivo del edificio y los guardamos, si seleccionamos la opción de actualizar variables el programa volverá a leer el archivo e implementará los cambios realizados. Podemos ver, además, como las variables de entrada que genera el programa para el type 56 (por ejemplo, temperatura ambiente o humedad) ya se encuentran conectados con el type 15 “Weather”, que se utiliza para la lectura de archivos meteorológicos. Automáticamente, TRNSYS genera además varios types 65, que generan distintas gráficas a partir de variables de salidas creadas también de manera autónoma por el programa. Sin embargo, será necesario para los resultados sustituir varios de estos types por otros que proporcionen valores relevantes.

Volviendo sobre el type 15, este es capaz de leer e interpretar archivos de información meteorológica en distintos formatos y convertirlos en valores legibles por el programa. Se ha utilizado un archivo meteorológico de la ciudad de Pontevedra para realizar la simulación. Este archivo proporciona multitud de parámetros (temperatura, humedad, azimut del sol, etc) para los 365 días del año. Complementando a este archivo se encuentra el type 77, que proporciona valores de temperatura del suelo para cada día.

A partir de aquí, comenzamos a insertar por nuestra cuenta los elementos necesarios en la simulación. En primer lugar, colocaremos el fancoil, type 928 de la librería HVAC TESS del programa. Es un fancoil de dos tubos con recirculación, que requiere del caudal, temperatura y humedad tanto del aire exterior (en nuestro caso, proveniente de la UTA) como del de recirculación. También se requiere el caudal de entrada y temperatura del líquido de calentamiento o enfriamiento, que será agua de la bomba de calor en nuestro caso. Este mismo type será el que utilizemos para simular nuestra UTA, ya que, a efectos de la simulación, fancoil y UTA funcionan de la misma manera, con la excepción de que para la UTA no contemplaremos un caudal de aire de recirculación. Por tanto, insertamos los modelos y les introduciremos en cada uno las variables acordes a la ficha técnica, las cuales se muestran a continuación.

ELEMENTO	POTENCIA (W)	CAUDAL NOMINAL (m³/hr)
UTA	600	4370
FANCOIL S	57	600
FANCOIL N	25	290

Tabla 3-5 Características fancoils y UTA

Una vez hemos creado nuestros fancoils y UTA, el siguiente paso será crear nuestra bomba de calor, utilizando el type 917. Este type simula una bomba de calor aire-agua, de tal forma que simplemente debemos introducirle los parámetros de la ficha técnica, los cuales se muestran en la tabla a continuación. Dicha bomba de calor irá conectada a un tanque, al cual surtirá de agua a mayor o menor temperatura, en función del modo de funcionamiento. La temperatura del tanque está siempre controlada, de tal forma que si su temperatura se sale de los rangos establecidos, la bomba de calor se pone en funcionamiento para mantenerlo en el margen que se designe. Desde este tanque, el fluido será distribuido a los distintos elementos de nuestro sistema de climatización.

PARÁMETRO	VALOR
Capacidad frigorífica máxima (kW)	138
Potencia frigorífica proporcionada por la bomba (kW)	44.6
Capacidad calorífica máxima (kW)	152
Potencia calorífica proporcionada por la bomba (kW)	44.9
Caudal de agua máximo (l/h)	26140
Caudal de aire máximo (m ³ /h)	36500
Capacidad del tanque (l)	1500
Potencia del ventilador (kW)	2.5

Tabla 3-6 Características bomba de calor

Pasamos ahora al control de la temperatura. Se han establecido dos termostatos (type166), uno por zona térmica, que monitorizan una temperatura indicada; en este caso, la de cada una de las zonas térmicas correspondientes a los espacios adyacentes al pasillo. El termostato mandará una señal de calentamiento cuando la temperatura descienda de 18°C, y una de enfriamiento cuando la temperatura supere los 27°C. De esta forma, se intentará mantener en todo momento una temperatura adecuada de uso en las zonas. Además de estas dos señales, existe una tercera señal, que se activa si es necesario calentamiento o enfriamiento; en definitiva, un OR lógico de las anteriores.

Las señales de calentamiento o enfriamiento irán conectadas a un calculador. A este calculador llegan también las señales del calendario anual de calentamiento y enfriamiento, que designa en que meses del año deben estar en funcionamiento el calentamiento y enfriamiento de la bomba de calor. Además, conectaremos posteriormente un calendario semanal y un horario, para analizar las repercusiones que tiene sobre el consumo y las temperaturas en el edificio. Tras analizar boletines anuales del tiempo en Pontevedra, se ha establecido que es conveniente realizar calentamiento desde octubre hasta abril, y enfriamiento desde abril hasta octubre, de tal forma que no exista solape. El calendario semanal establecerá que solo se debe realizar calentamiento o enfriamiento en días laborables y sábados en el período de mañana (hasta las 14 PM), y por último el horario se configurará inicialmente de tal forma que la bomba de calor comience a funcionar a las 08 AM y se desactive a las 08 PM. Al realizar el producto de las variables de calor y de frío, es decir, la variable de calor de los termostatos sumada, multiplicada por las variables de calor de los calendarios y el horario, y viceversa, obtenemos las señales de calor y frío. Estas serán las que indiquen a la bomba de calor y la UTA si deben o no calentar o enfriar el agua o aire, respectivamente. Si bien esto puede resultar confuso, con un ejemplo podremos comprender fácilmente su funcionamiento; si en un día laborable, en horario laborable, del mes de enero, cualquiera de los termostatos se activase, se comenzaría a calentar la zona asociada. Si el termostato se activase, pero no estuviéramos en horario laborable, o simplemente fuese domingo, no se produciría ninguna acción.

Por último, se han incluido integradores sobre la potencia de los distintos elementos del sistema, para poder analizar los consumos en función de su funcionamiento. Los valores se extraerán a un archivo de Excel para cada hora de simulación, para posteriormente ser graficados en la hoja con el objetivo de comparar resultados y analizar los consumos en distintos días, semanas o épocas del año.

3.4 Resumen del apartado

El sistema de climatización de la planta baja del CUD utiliza una Unidad de Tratamiento de Aire que toma aire del exterior, lo pretrata térmicamente y lo distribuye a través de conductos y plenums. Los

despachos reciben aire tratado por fancoils que mezclan aire de recirculación con el de la UTA. La calefacción y refrigeración se gestionan mediante una bomba de calor aire-agua, que envía agua a diferentes elementos del edificio.

Se emplean varios tipos de fancoils, cuyas características se extraen de las fichas técnicas de los mismos. El aire se distribuye por el falso techo, donde las diferencias de presión ayudan a la ventilación. En los pasillos, el aire se distribuye directamente desde la UTA.

El modelado del edificio se realiza con Sketchup, representando físicamente las zonas térmicas y sus componentes. Estas zonas se utilizan luego en TRNSYS, un software de simulación de sistemas transitorios, donde se configuran las propiedades térmicas del edificio.

Las superficies se caracterizan en TRNBUILD, asignando capas de materiales con sus propiedades térmicas. Para las ventanas, se selecciona un modelo preexistente similar al real. La ventilación se configura con caudales y temperaturas de entrada en las distintas zonas térmicas.

La simulación en TRNSYS incluye todos los elementos indicados: fancoils, UTA y una bomba de calor, configurados con datos técnicos específicos. El control de temperatura se realiza mediante termostatos y un calendario de operación, estableciendo periodos de calentamiento y enfriamiento. Añadiendo elementos de control de resultados, podremos extraerlos para analizarlos y sacar las conclusiones pertinentes.

4 RESULTADOS

4.1 Descripción del apartado

En el siguiente apartado, se exponen los resultados obtenidos, en distintas gráficas, comparándolos con resultados experimentales de otros TFG, para analizar la veracidad de nuestro modelo en distintas condiciones y modos de funcionamiento

4.2 Escenarios para la obtención de resultados

Para el análisis de los resultados, en primer lugar, tomaremos como periodo de referencia una semana completa, para poder comprobar que nuestros controladores han causado el efecto deseado. Estudiaremos cuatro supuestos. En el primero, permitiremos que el sistema funcione de manera continua las 24 horas del día los 7 días de la semana, para tener una referencia de los consumos que nos aseguran mantener las temperaturas dentro de los valores requeridos durante toda la simulación. Acto seguido, el sistema funcionará únicamente en horario laboral, con la excepción de la bomba de calor, que funcionará al 50% de su capacidad fuera de la jornada laboral (esto se realizará dividiendo la potencia del sistema entre dos en dichos períodos). En el tercer supuesto, el sistema en su totalidad funcionará al 100% en horario laboral y al 50% fuera del mismo (aplicando el mismo método que con la bomba de calor). Por último, estableceremos el horario de manera estricta, de tal forma que el sistema en su conjunto funciona al 100% en horario laboral y está completamente apagado fuera del mismo.

Escenario	Descripción
Escenario 1	Funcionamiento continuo del sistema, 24 horas al día durante toda la semana
Escenario 2	Funcionamiento del sistema únicamente en horario laboral. La bomba de calor mantiene un funcionamiento al 50% en periodo no laboral, para mantener la temperatura del tanque
Escenario 3	Funcionamiento del sistema únicamente en horario laboral. Fuera de horario laboral, todos los componentes del sistema operan al 50%
Escenario 4	El sistema opera de manera estricta según el horario; por tanto, solo funciona en horario laboral

Tabla 4-1 Escenarios de simulación

Estudiaremos por una parte el comportamiento de la bomba de calor, ya que es el componente con un consumo más significativo. Compararemos su consumo en los distintos escenarios, tanto diariamente como en total, y también veremos el consumo total del sistema para la semana en los distintos supuestos. Por último, realizaremos un análisis de las temperaturas para comprobar que efectivamente estamos dentro de los márgenes establecidos en el RITE (2.2). Compararemos estos valores con valores reales.

Por último, tomaremos los valores mensuales de consumo para los escenarios 3 y 4, y los compararemos con valores reales de consumo, para evaluar la veracidad de nuestros modelos e identificar oportunidades de reducción de consumo.

Los valores reales, debido a limitaciones de tiempo y accesibilidad, serán tomadas de Trabajos Fin de Grado de años anteriores que tratan temas similares. En dichos casos, se señalará debidamente la proveniencia de las mediciones.

4.3 Consumo semanal de la BC

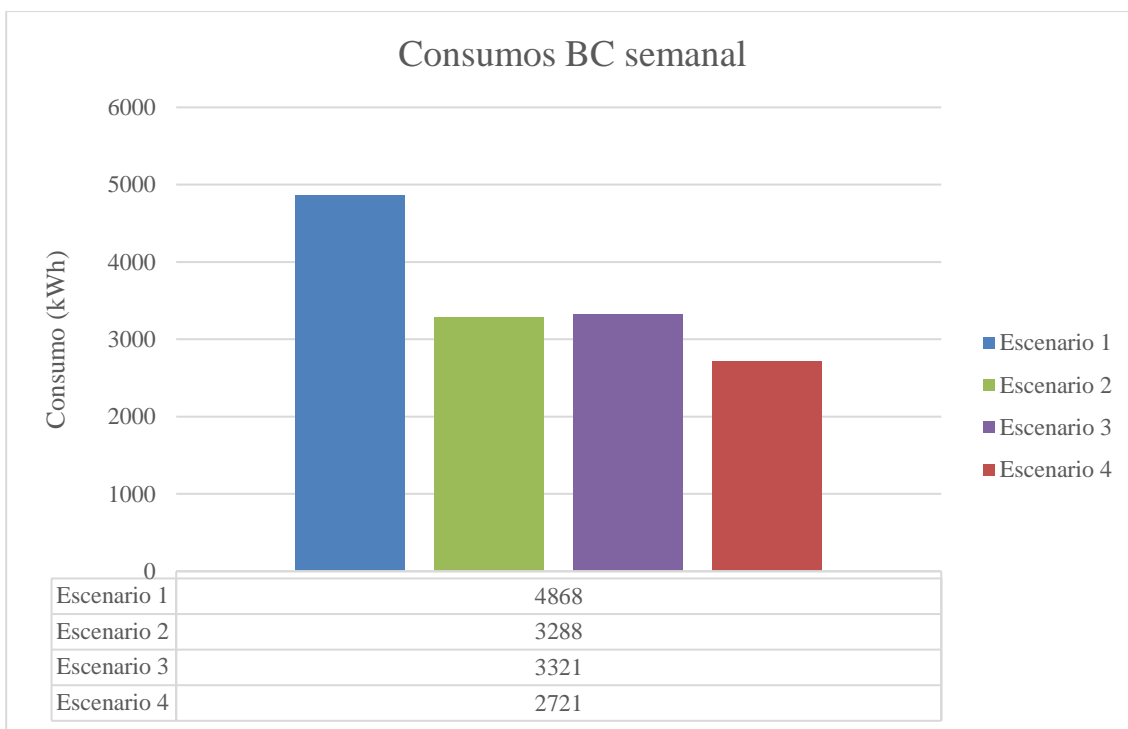


Figura 4-1 Consumo semanal de la bomba de calor

A primera vista, observamos como, lógicamente, existe una diferencia notable entre el funcionamiento continuo y el resto de los supuestos, así como el supuesto con menor consumo es aquel en el que sistema trabaja siguiendo de manera estricta el horario. Sin embargo, los valores para los otros dos supuestos son similares, y se encuentran relativamente próximos al escenario 4.

Por tanto, podemos deducir que mantener el sistema en funcionamiento en el período en que el edificio no es utilizado, puede tener ciertos beneficios. En primer lugar, mantener el edificio dentro de un margen de temperaturas menor implica que los componentes del sistema no deberán enfrentar un esfuerzo mayor en el momento de comenzar a funcionar, ya que la caída de temperatura en el interior del edificio implica que la diferencia entre la temperatura en ese instante, y la deseada es menor que si debemos arrancarlo desde cero. Además, al realizarse el consumo adicional mayormente en el arco nocturno, la diferencia es mínima en cuanto a gasto al dejar el sistema funcionando, como en los escenarios 2 y 3, en relación con los beneficios a largo plazo en cuanto a cuidado y mantenimiento del sistema. Además, el sistema se encontraría apagado, como ya se ha mencionado, en el periodo desde el sábado a finalización del horario hasta las 00:00 del lunes, donde volvería a funcionar al 50%. Esto

elimina las posibles repercusiones del funcionamiento continuo del sistema, y asegura que en el momento de comenzar la jornada el lunes el interior se encuentra convenientemente ventilado.

4.4 Consumos diarios de la BC

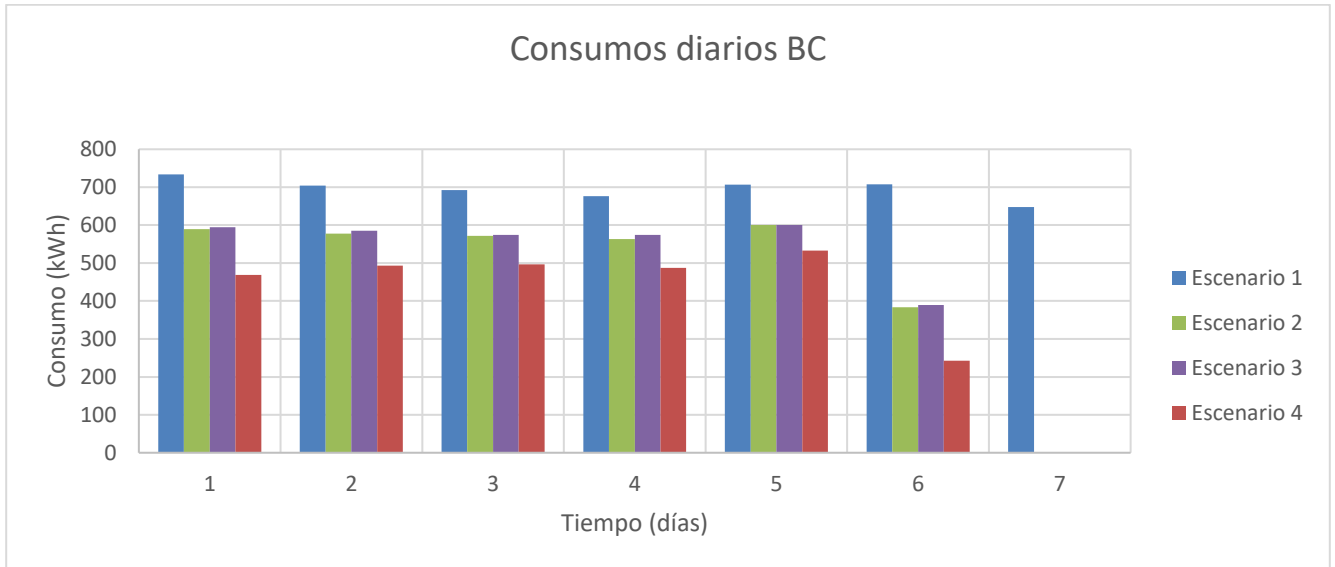
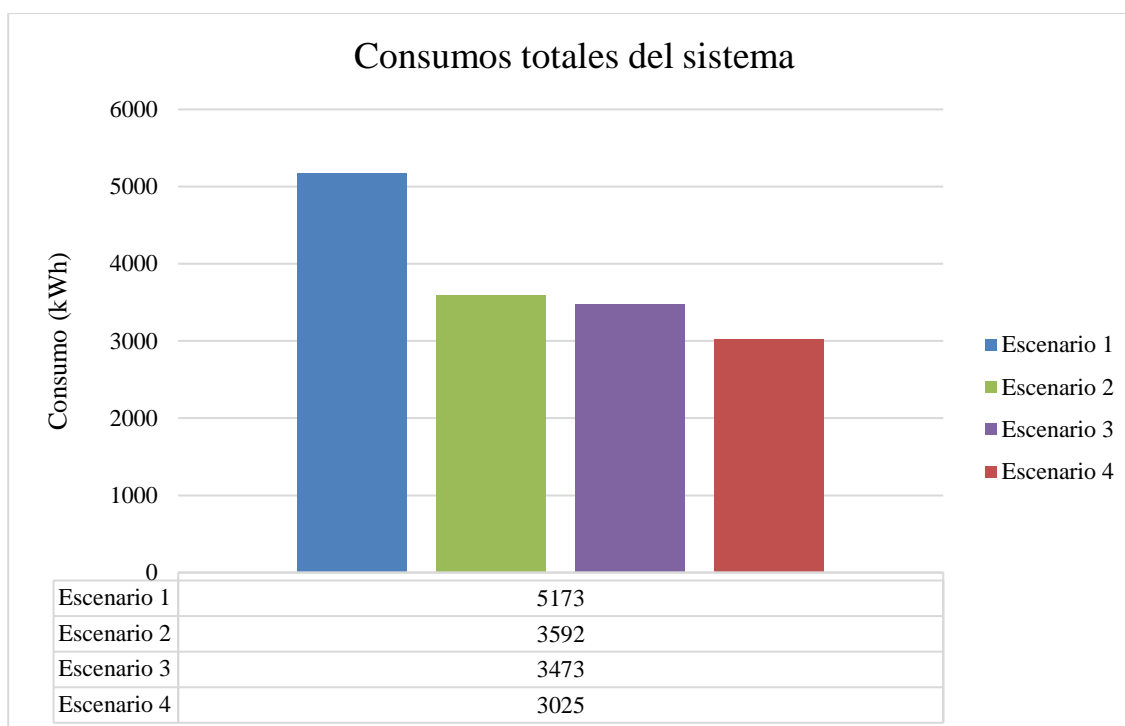


Figura 4-2 Consumos diarios de la bomba de calor

Pasando ahora a estudiar el consumo diario de nuestra BC. Si bien los valores resultan distintos, vemos que las tendencias de los distintos escenarios planteados son similares. Esto nos indica, en primer lugar, que los distintos controles y supuestos se han planteado con éxito, ya que discrepancias en cuanto a la tendencia para valores de temperatura iguales serían un indicativo de que los escenarios no están bien implementados. En cuanto a las conclusiones del modelo, vemos como ese ahorro que veíamos reflejado en el apartado anterior se materializa a lo largo de toda la gráfica entre el funcionamiento continuo y los demás supuestos, si bien es el periodo de fin de semana en que es más evidente. También vemos como, a pesar de estar estableciendo un funcionamiento del 50% para los dos últimos escenarios, el consumo en estos casos no es exactamente intermedio, sino que se aproxima en mayor medida al funcionamiento estricto del sistema. La diferencia media en un día laborable entre el funcionamiento continuo y los dos supuestos en cuestión está en 110 kWh, mientras que entre estos dos supuestos y el funcionamiento con horario estricto es de 85 kWh, lo que indica que ese periodo en que el sistema funciona al 50% permite ahorrar durante el resto del día.

4.5 Consumos totales del sistema



Continuando al consumo total del sistema, vemos como si bien las tendencias generales se mantienen, existen una serie de sucesos importantes de analizar. El primero es que los consumos son solo ligeramente superiores a los del punto 4.3, dando a entender que la bomba de calor es el elemento que mayor consumo genera y por tanto aquel en el que se deben centrar los esfuerzos a la hora generar ahorro en el sistema. En segundo lugar, vemos como los consumos de los tres últimos escenarios se asemejan aún más, dando aún más importancia a la idea de mantener los elementos del sistema funcionando al 50% en los periodos de no ocupación del edificio. Además, vemos como analizando los consumos totales, finalmente se genera un menor consumo si el sistema en su conjunto opera al 50%. Sin embargo, las diferencias continúan siendo mínimas. Por último, analizando porcentualmente los consumos, vemos como el segundo caso genera un ahorro del 41.52%, mientras que los dos últimos casos generan un ahorro del 31% aproximadamente. Esto, unido a que esa diferencia del 10% en consumo se daría en periodos en los que el coste eléctrico es generalmente menor (arco nocturno y madrugada), apoya los beneficios de mantener el sistema al 50% fuera del periodo laboral.

4.6 Temperaturas

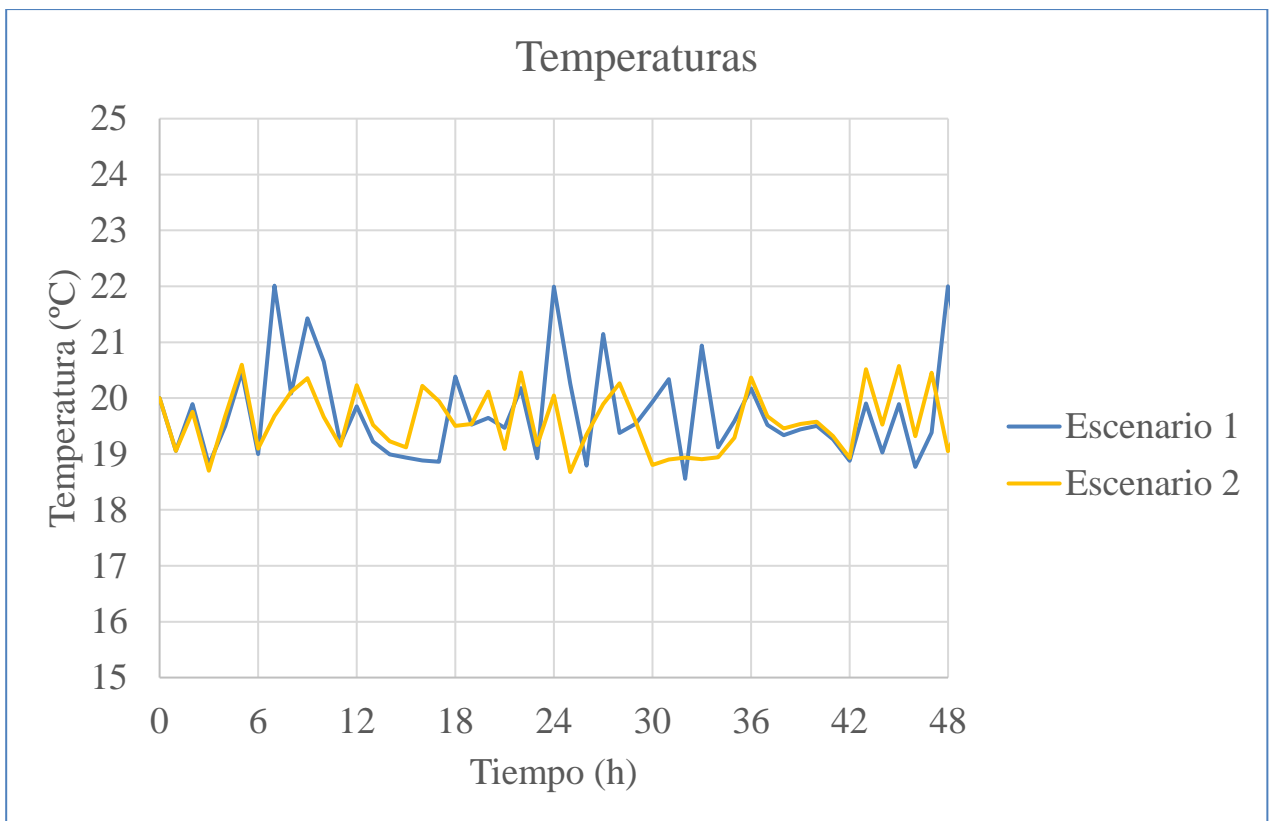


Figura 4-3 Temperaturas para los escenarios 1 y 2

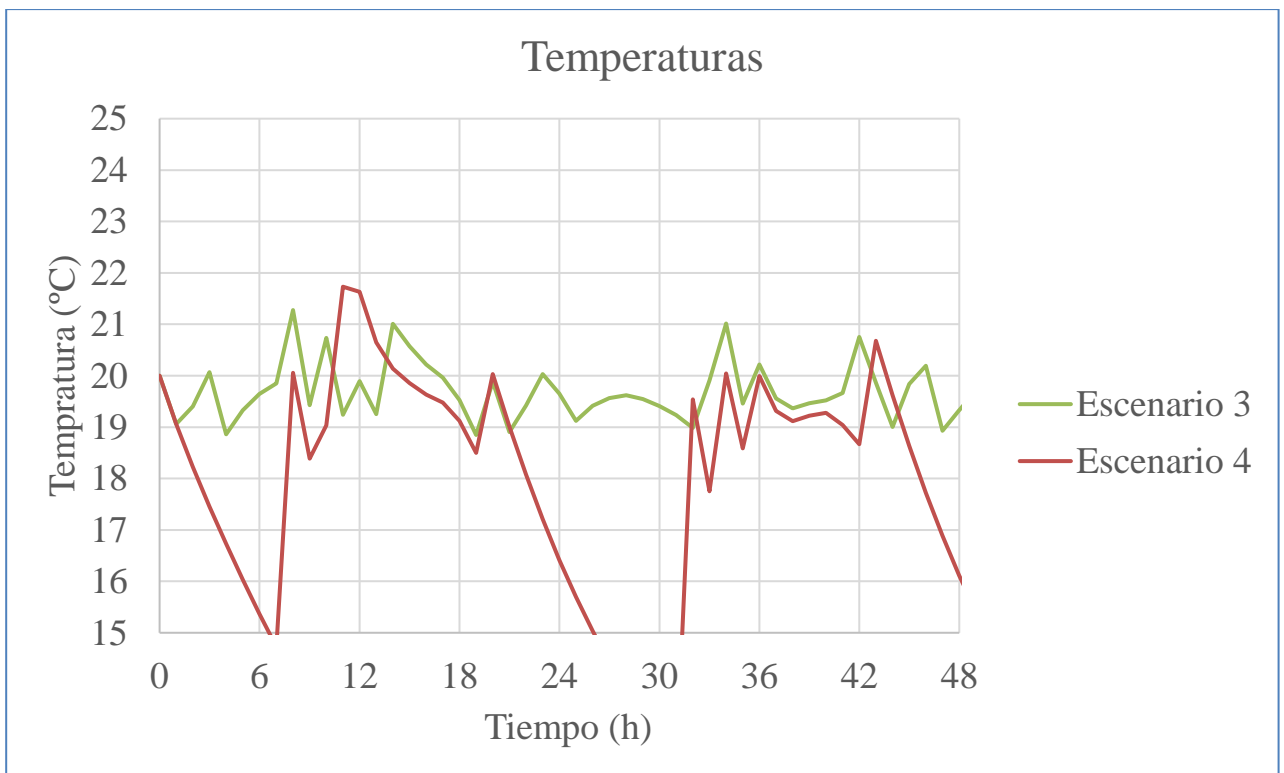


Figura 4-4 Temperaturas para los escenarios 3 y 4

Pasando a las gráficas de temperaturas, hemos estudiado la zona S de despachos, ya que es aquella que no recibe iluminación solar debido a su orientación y sería, por tanto, la más crítica cuando la bomba

de calor funciona en calentamiento. Vemos como para el primer escenario, el continuo funcionamiento provoca que en ocasiones nos encontremos con valores por encima de los 21°C permitidos, aunque en ningún caso estemos por debajo de 17°C. Sin embargo, en los escenarios 2, 3 y 4, somos capaces de mantenernos casi con totalidad por debajo de los valores indicados. Una conclusión importante es que el control de la temperatura en los dos últimos casos conlleva que el sistema es capaz de funcionar con mayor fluidez, y sin excederse al tratar de aumentar de manera inmediata la temperatura desde valores demasiado bajos. Como añadido a este análisis, los datos también indican valores de humedad ubicados en todo caso entre el 30 y 70%, por tanto, los valores de temperatura de este análisis son válidos.

4.7 Comparación con valores experimentales

Para comparar con valores experimentales, se ha tomado como referencia el *trabajo fin de grado “Determinación de parámetros de funcionamiento y control de una UTA y diseño de un sistema de adquisición de datos”*, del AF Gómez de Olea Martín, en el curso académico 2020-21. Podemos observar cómo realiza mediciones de temperatura en distintas estancias, obteniendo los siguientes resultados:

Ubicación	Temperatura medida (°C)	Temperatura exterior en el momento de la medición (°C)
Despacho en la zona S	20,6	14,8
Despacho en la zona N	23,2	14,8

Estos valores se encuentran en intervalos similares a los otorgados por nuestro sistema, dado que, para temperaturas exteriores similares (en nuestro caso, se encontrarían en los periodos de mañana, por ejemplo, entre las 8 y las 12 horas de las gráficas previas), somos capaces de mantener la temperatura en valores similares a los medidos experimentalmente.

Por otra parte, para comparar los consumos de la bomba de calor, utilizaremos el trabajo del AF Marino Fernández Bravo Casado, del curso académico 2015/16. Para ello, se han realizado mediciones para tres meses completos (enero, marzo y julio), en los escenarios 3 y 4. Se han escogido estos dos, ya que son aquellos cuyas conclusiones serán más relevantes, ya que el primer escenario genera valores demasiado elevados para que su comparación sea relevante, y los valores de los escenarios 2 y 3 son similares a nivel mensual, siendo el consumo en el escenario 3 ligeramente inferior. Se han comparado con valores obtenidos de consumo para el año 2013 en dichos meses.

Mes	Bomba de calor real (kWh)	Bomba de calor escenario 3 (kWh)	Bomba de calor escenario 4 (kWh)
Enero	10599	13105	10884
Marzo	10286	11059	11565
Julio	7645	4923	8210

En primer lugar, se observa que los resultados del modelo se asimilan a los valores reales. Por tanto, esto nos permite en primer lugar comprobar la veracidad de las mediciones. Si continuamos analizando los resultados, veremos como el escenario 4 se acoge con gran exactitud a los resultados reales del sistema, por tanto, sería el más apropiado para predecir su funcionamiento. Pero el dato más relevante de la tabla se encuentra en el escenario 3 para el mes de julio. Es el único momento dato menor que el escenario real, además con una diferencia notable. Esto nos lleva a un razonamiento claro; al introducir aire durante el período nocturno, las necesidades de tratamiento sobre dicho aire son mínimas, ya que se

encuentra a temperaturas más bajas que en el arco diurno. Esto permite que el edificio se mantenga dentro de los márgenes de temperatura deseados en el arco nocturno, y durante el arco diurno solo tengamos que realizar un consumo para mantener dicha temperatura.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Descripción del apartado

En el siguiente apartado, se recogen aquellas conclusiones a las que se ha llegado en la realización del trabajo, así como líneas futuras para otros TFGs o proyectos a realizar.

5.2 Conclusiones

En primer lugar, se debe analizar si se han cumplido los objetivos del trabajo. La recopilación de información en cuanto al entorno a analizar, es decir, la planta baja del edificio del CUD y de su sistema de climatización, ha sido provechosa, dando lugar a un estudio del cual se puede comprender la disposición del sistema, los aspectos relevantes de la envolvente del edificio y sus particularidades.

En cuanto a la realización del sistema transitorio, es evidente que las dificultades de un software como TRNSYS implican que es necesaria la experiencia para ser capaz de corregir errores e identificar e interpretar los datos relevantes. Aun así, se ha conseguido realizar un modelo sencillo, pero que proporciona valores de consumo similares a los reales y, sobre todo, que permite realizar variaciones en el funcionamiento del sistema, permitiendo que se puedan ver que repercusiones tendrían antes de implementarlas en la realidad.

Por otra parte, las mediciones experimentales han debido ser tomadas de otro TFG. La falta de mediciones en la primera entrega de esta memoria, unida a la realización del TFG a distancia en el período hasta la segunda entrega, implica que los datos experimentales hayan debido ser extraídos de otro TFG.

En cuanto a la exactitud del modelo obtenido, se ha conseguido llegar a un modelo final que proporciona valores de gran similitud a los reales. Tanto los consumos, como las temperaturas obtenidas, son escalables y asimilables a la instalación de climatización que simulan. Además, el objetivo último de este TFG, que es el de tratar de identificar oportunidades de reducir el consumo, también se puede considerar como adquirido, al menos de manera parcial. Tras realizar la simulación, se ha visto en primer lugar los múltiples beneficios que puede tener para la instalación los escenarios 2 y 3 que se mencionan en el apartado 4.2. La relación costo-beneficio es favorable a implementar estos escenarios en el sistema, ya que el consumo generado es pequeño en relación con los beneficios que genera en cuanto a la envolvente del edificio. Además, se ha identificado otra oportunidad de reducción de consumo; mantener el sistema en funcionamiento de manera parcial, en los meses de mayor temperatura exterior. Esto permitiría mantener durante un gran período de tiempo la temperatura del edificio entre los valores

permitidos, con un costo mínimo (la temperatura del aire en el arco nocturno es más baja que en el arco diurno, y además el precio del kWh en la franja nocturna es mucho menor). Por tanto, en la franja diurna en la que el edificio está en uso, solo habría que mantener la temperatura en ese margen, en lugar de tener que llegar a los valores permitidos “desde cero”.

5.3 Líneas futuras

Una línea de acción futura que podría dar lugar a un TFG provechoso y, sobre todo, aplicable en la realidad, sería un estudio de patrones de vida, meteorología y características del edificio, para crear un algoritmo de control único que gestionase el consumo del sistema de climatización del edificio, permitiendo un ahorro sustancial a la vez que mejorando las condiciones de los que trabajan en él. Si bien en este proyecto, se ha podido llegar a una simulación provechosa, los efectos de la actividad sobre el consumo podrían mejorar la precisión del modelo e incluso permitir implementar un control sobre la instalación real.

Otra línea futura de interés sería estudiar otros tipos de sistemas de climatización para el mismo entorno, viendo si permitirían un ahorro provechoso, y que sistema sería más conveniente para un entorno húmedo como en el que nos encontramos. Esto podría desembocar incluso, en la realización de un estudio de viabilidad para analizar la rentabilidad de reemplazar la actual infraestructura de climatización. Esta línea de acción genera además la oportunidad de aplicar sistemas de climatización con energías renovables, proporcionando una alternativa sostenible, que ayudaría a reducir el consumo y que, en su mayoría, cuenta con subvenciones para su aplicación.

Por último, también sería interesante realizar un estudio particular de una estancia de la planta baja. Si bien en este modelo se pueden obtener resultados por zonas, el sistema de climatización es suficientemente complejo como para que realizar un estudio concreto de un despacho, de manera continua y complementado con información de este u otros TFGs, ayudaría a comprobar el correcto funcionamiento del sistema.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «ASHRAE ASHRAE Handbook: HVAC Systems and Equipment. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers».
- [2] «Documento básico HS Salubridad». Accedido: 7 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/Salubridad.html>
- [3] «Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.».
- [4] «BOE-A-1997-8669 Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.» Accedido: 1 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1997-8669>
- [5] «ABC de Sevilla, “Lo que Sevilla le debe a Willis Carrier, inventor del aire acondicionado”». [En línea]. Disponible en: https://www.abc.es/sevilla/ciudad/sevi-sevilla-debe-willis-carrier-inventor-aire-acondicionado-201807031113_noticia.html&psig=AOvVaw0xJhRrXgoG9cFS4ZeQpVTm&ust=1719607919157000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBcQjhXqFwoTCICq3ezU_IYDFQAAAAAdAAA AABAE
- [6] *Thumann, A., & Younger, W. J. (2017). Handbook of Energy Audits (9th ed.). Lilburn, GA: The Fairmont Press, Inc.*
- [7] «Guía técnica Instalaciones de climatización con equipos autónomos. | Idae». Accedido: 7 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.idae.es/publicaciones/guia-tecnica-instalaciones-de-climatizacion-con-equipos-autonomos>
- [8] «Fanger, P. O. (1970). Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. Danish Technical Press.»
- [9] «OMS Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants. World Health Organization.»
- [10] «Jones, A.P. Indoor air quality and health. Atmospheric Environment».
- [11] «Eurovent Certita Certification : ¿Qué es una unidad de tratamiento de aire (UTA)?» [En línea]. Disponible en: <https://www.eurovent-certification.com/es/category/technical-insights/what-is-an-air-handling-unit-ahu?universe=4-non-residential-ventilation-iaq>
- [12] «Eurovent Certita Certification : All you need to know about air handling unit filters». Accedido: 7 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.eurovent->

certification.com/en/category/article/all-you-need-to-know-about-air-handling-unit-filters?universe=air-quality-and-ventilation

[13] «Filtros de bolsa», Camfil. [En línea]. Disponible en: <https://www.camfil.com/es-es/productos/filtros-ventilacion-general/filtros-bolsa>

[14] «Figura 2.3 Clasificación filtros absolutos». [En línea]. Disponible en: https://res.cloudinary.com/rs-designspark-live/image/upload/c_limit,w_829/f_auto/v1/article/3%29_Single_Double_inlet_a80e5f60b13a44d3f2ec65ca86d83508b0865be7

[15] «Filtro Plano - Linter Filters Industriais», Linter Filtros Industriais. [En línea]. Disponible en: <https://linterfiltros.com.br/es/funciones-y-aplicaciones-de-filtro-plano/>

[16] R. Fernandez, «La normativa UNE EN 1822 y los tipos de filtros | Labsom», Labsom | Diseño y construcción de Salas Blancas. Accedido: 18 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://labsom.es/blog/normativa-une-en-1822-clasificacion-filtros-absolutos-epa-hepa-ulpa/>

[17] «Figura 2.4 Ventilador centrífugo de doble entrada». [En línea]. Disponible en: <https://www.iqsdirectory.com/articles/blower/industrial-fans/blade-positions-for-centrifugal-fans.jpg>

[18] Y. A. Cengel y M. A. Boles, *Termodinámica*, Séptima.

[19] J. S. Hunter, «A design philosophy for centrifugal fans», thesis, Loughborough University, 1996. Accedido: 17 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://repository.lboro.ac.uk/articles/thesis/A_design_philosophy_for_centrifugal_fans/9577856/1

[20] «Comparison of Direct and Indirect Active Thermal Energy Storage Strategies for Large-Scale Solar Heating Systems». [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/10/1948>

[21] «Figura 2.8 Fancoils de 4 y 2 tubos». [En línea]. Disponible en: <https://i.pinimg.com/originals/07/f9/fc/07f9fc880177adb4d866fbca0e84c507.jpg>

[22] «Müller, G., Gollwitzer, H., & Wetter, M. (2020). Heat Pump Systems. Springer.»

[23] «<https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/geotermia/bomba-de-calor-geotermica-funcionamiento-instalacion.html>&psig=AOvVaw3DZKaCqQxVTpF4ZaMXCsRb&ust=1719604088817000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBcQjhqFwoTCNjc78vG_IYDFQAAAAAAdAAAAABAE».

[24] «US EPA. (2020). Energy Efficiency for Heating & Cooling. U.S. Environmental Protection Agency.»

[25] «Wang, S., & Ma, Z. (2014). Supervisory and optimal control of building HVAC systems: A review. HVAC&R Research, 14(1), 3-32.»

[26] «Freire, R. Z., Oliveira, G. H. C., & Mendes, N. (2008). Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings. Energy and Buildings, 40(7), 1353-1365.»

[27] «Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., & Vanoli, G. P. (2012). Evaluation of energy savings in buildings through the optimal integration of energy systems. Applied Energy, 89(1), 421-428.»

[28] «Sailor, D. J. (2011). A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. International Journal of Climatology, 31(2), 189-199.»

[29] «United States Environmental Protection Agency (EPA). (2023). Volatile Organic Compounds (VOCs) in Your Home.»

[30] «World Health Organization (WHO). (2023). Nitrogen Dioxide (NO₂).»

[31] «Guía técnica Procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios | Idae». Accedido: 7 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.idae.es/publicaciones/guia-tecnica-procedimientos-y-aspectos-de-la-simulacion-de-instalaciones-termicas-en>

[32] «Planos del edificio del Centro Universitario de la Defensa». [En línea]. Disponible en: <https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1vU3I9XQ8mW3sR0DjhPX0iyYkPPO24y95>

[33] «Tabique Pladur® 130 (70-45) 4F MW - Pladur». Accedido: 3 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://corporativo.pladur.com/es-es/sistemas/tabiques-distribucion-pladur/multiple/tabique-pladur-130-70-45-4f-mw/>

[34] «Tipos de ventanas con doble acristalamiento - El Blog de CLIMALIT®», Climalit. Accedido: 3 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://climalit.es/blog/ventanas-con-doble-acristalamiento/>

[35] «Ficha técnica fancoil FCX-P, Aermec». [En línea]. Disponible en: www.aermec.es

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

Las implicaciones sociales, económicas y ambientales de este TFG son varias. En primer lugar, la búsqueda de una optimización en el control de la infraestructura de climatización afecta de gran manera a dos de esos tres campos. En lo económico, dado que el ahorro que puede suponer la optimización de la energía invertida de manera innecesaria puede suponer un gran beneficio para el centro y para la Escuela Naval Militar. En cuanto a las implicaciones ambientales, tendemos a pensar que una luz encendida, o un grifo abierto de más un breve periodo de tiempo, no supone nada. Y es verdad que las consecuencias de estas acciones son mínimas, pero si se amontonan pueden provocar un impacto grave en el medio ambiente. Y si consideramos ya, que, en lugar de hablar de una bombilla encendida, estamos hablando de cerca de 20 equipos de ventilación y una bomba de calor funcionando sin necesidad, nos damos cuenta de que las consecuencias pueden ser importantes.

Por otra parte, también es relevante apuntar el propio cometido de la unidad que estamos estudiando; proporcionar un aire de calidad a los usuarios de este edificio. Durante la realización del trabajo, se ha tenido presente que no estamos tratando con algo etéreo o conceptual, sino con un sistema real que tiene un impacto tangible sobre las condiciones de trabajo de un número importante de personas. Es por ello, que se ha prestado especial atención a las condiciones reflejadas en las zonas habitables, ya que son en las que tenemos que centrar el esfuerzo.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

En este trabajo nos vemos enfrente de un dilema ético que es muy común en nuestra sociedad actual; el balance entre el ahorro energético, el económico, y la calidad de un servicio del que hacemos uso. Es evidente que, en una sociedad dominada por el consumo y la búsqueda de la comodidad, donde las preocupaciones éticas se convierten muchas veces en armas al servicio de aquel al que le sean convenientes en un momento oportuno, es difícil establecer un balance entre estos aspectos. Sin embargo, debe ser nuestra preocupación ser siempre responsables con el consumo energético, ya que este afecta de manera directa a diversas preocupaciones éticas y sociales en el mundo actual. Y es evidente y razonable buscar el máximo ahorro económico, pero nunca deber ser a costa de la calidad de un servicio que proporcionamos a las personas, especialmente si este servicio afecta directamente a su calidad de vida o incluso a su salud.

Dicho esto, también surge una reflexión añadida, y es la legitimidad del sinfín de legislaciones y reglamentos acerca de calidad de aire y habitabilidad en ciertas zonas. Si bien es cierto, que en su mayoría tienen como objetivo preservar la salud de la sociedad, en ocasiones unos requerimientos descontrolados pueden venir con motivaciones distintas que la calidad de vida de los usuarios.

Por último, debemos tener siempre presente, que estos medios deben estar al alcance de todo el mundo, y eso no significa proporcionar ayudas, sino dotar a la población general de herramientas que le permitan comprender por qué es importante la calidad del aire en sus viviendas y trabajos, y que medios están dentro de su capacidad adquisitiva, siendo proporcionados con los hogares de cada uno.