

Trabajo Fin de Máster

CARACTERIZACIÓN DE LA INERCIA TÉRMICA Y ANÁLISIS DE DATOS DE CALIDAD DE AIRE INTERIOR EN EDIFICIOS DEL SECTOR TERCIARIO.

Autor

Miguel García-Monge Rábanos

Directora

Belén Zalba Nonay

Agradecimientos

Quiero agradecer especialmente a mi tutora Belén Zalba por su interés, dedicación y motivación, con los cuales me ha orientado a lo largo de estos años, marcando mi desarrollo académico y personal.

A Silvia Guillén, por su colaboración durante el curso pasado y por su apoyo en la publicación del artículo.

Al personal de la Oficina Verde, especialmente a David Cambra, por lo que he aprendido de él y por sus sugerencias desde su visión como técnico, y a Máximo Bolea.

Gracias a la *beca de apoyo para la gestión, monitorización y reducción del consumo de energía primaria de los espacios*, he tenido la oportunidad de conocer el funcionamiento de la Oficina Verde y aprender a utilizar la herramienta Power BI, empleada en este trabajo.

Al personal de Mantenimiento, por facilitarme el acceso al sistema SCADA y proporcionarme información acerca de las instalaciones de los edificios de la Universidad de Zaragoza y sus sugerencias para enriquecer este trabajo. Especialmente a Salvador Nevot, Manuel Bayod, Juan Antonio Parilla, Laura Moya, Julio Roy y Alfredo Albero.

A todas las demás personas, que han hecho que este trabajo sea posible.

Resumen

Este trabajo se sitúa en la línea de investigación de experimentación en edificios a través del análisis de datos, que permite evaluar el comportamiento de los edificios en términos de eficiencia energética y calidad ambiental. Además, facilita la toma de decisiones basadas en datos, por parte de los responsables de infraestructuras de la universidad.

La memoria comienza con una **revisión bibliográfica**, cuyo propósito es establecer los objetivos del estudio y extraer conclusiones basadas en trabajos previos. El trabajo se ha sintetizado en dos capítulos principales: el capítulo 1, dedicado a la **caracterización de la inercia térmica de los edificios de la universidad**, y el capítulo 2, enfocado en el **análisis de datos de calidad del aire interior en el edificio de Filosofía y Letras**. Estos capítulos recopilan los aspectos más destacados de los informes que se han ido desarrollando, los cuales se encuentran disponibles en el anexo.

El **capítulo 1** tiene como objetivo analizar el comportamiento de los edificios de la Universidad de Zaragoza y de sus sistemas de climatización en modo calefacción, a partir de los registros de temperatura de más de 400 sensores. Este análisis permitirá evaluar la posibilidad de establecer un horario de encendido de la climatización adaptado al comportamiento térmico de cada edificio y la capacidad de los sistemas de climatización instalados, garantizando la eficiencia energética y el confort térmico. Para ello, se ha desarrollado una metodología que permite caracterizar la inercia térmica de los edificios e instalaciones de climatización, calculando en Matlab las **pendientes de ascenso de la temperatura interior (°C/h)** en la franja de encendido de los sistemas de calefacción. Para el análisis de los resultados obtenidos, se ha creado un visor en Power Bi (descrito en el informe 24 del anexo), que recoge además información relevante de los edificios de la Universidad. Además, en este visor, cualquier usuario puede elegir un edificio y periodo de tiempo específico para analizar los datos disponibles. Se ha puesto de manifiesto que hay claras **diferencias entre los edificios** de la Universidad, cuantificando que las pendientes oscilan **entre 0,3 y 3 °C/h en promedio mensual**, un dato que no se conocía antes de realizar este estudio. Por tanto, **parece razonable agrupar los edificios que se comporten de forma similar, de cara a plantear unos horarios de encendido de la climatización distintos para cada tipología**. Para cada edificio, también se observa variación de las pendientes entre sus estancias y a lo largo del tiempo, por lo que se han estudiado y evaluado algunos de los factores que podrían influir en dicha variación. Se ha confirmado que, en algunos edificios, existe correlación entre las pendientes calculadas y la temperatura exterior, la temperatura interior o el día de la semana. Finalmente, en base a estos resultados, se propone una metodología para determinar el momento de encendido de la calefacción, acompañada de una justificación sobre la elección de un modelo experimental en lugar de uno físico basado en simulación.

En el **capítulo 2** se ha llevado a cabo el análisis de la **calidad de aire interior** en 10 espacios diferentes del nuevo edificio de **Filosofía y Letras**. Previamente se verificó el correcto funcionamiento de los sensores, comparando las mediciones de los distintos **sensores en una misma ubicación** durante más de un mes. Se observa un claro aumento de los **TVOC** (Compuestos Orgánicos Totales) con la temperatura y, en ciertos espacios, destaca la similitud en la tendencia de los TVOC y del CO₂ (ocupación). El **formaldehído** presenta valores elevados en aulas, especialmente cuando no hay ocupación, por lo que se estima que el mobiliario puede ser la causa principal. Se han identificado los espacios en los que hay un mayor porcentaje de tiempo con alguno de los contaminantes por encima del umbral deseado y, por tanto, sería recomendable **eliminar las fuentes de contaminantes** si es posible, y/o aumentar el **caudal de ventilación**. Se ha propuesto mantener un caudal mínimo de ventilación para combatir las fuentes de contaminación relacionadas con los materiales de construcción y el mobiliario, incrementándolo cuando las temperaturas son más altas. Además, en este capítulo se describe una sección de la herramienta Power Bi desarrollada para calcular el porcentaje de tiempo en franjas de **temperatura** en intervalos de 2°C entre 17 y 27°C, con el fin de conocer el estado de los edificios en un instante o periodo de tiempo dado, verificando si están en rangos de temperatura adecuados, además de poder identificar anomalías en espacios concretos.

En resumen, este trabajo muestra el **potencial de la monitorización en continuo** para analizar el **comportamiento de los edificios y proponer mejoras**, que garanticen una **adecuada calidad del aire y confort**, así como **un uso adecuado de la energía**.

Índice

Agradecimientos	2
Resumen	3
Glosario de términos.....	5
Listado de figuras	7
Relación de este trabajo con los ODS	8
Contexto del TFM.....	9
Introducción y revisión bibliográfica.....	10
Energía y edificios	10
Calidad de aire interior en edificios	14
1. Caracterización de la inercia térmica.....	16
2. Análisis de datos de calidad de aire interior.....	28
Conclusiones	33
Líneas de futuro	35
Bibliografía	36
Anexo (documento adjunto a esta memoria)	

Glosario de términos

B

BAS

Building Automation Systems (sistema de automatización de edificios).....

BMS

Building Management Systems (sistemas de gestión de edificios)

BREEAM

Building Research Establishment Environmental Assessment Method

C

CAE

Certificado de Ahorro Energético

CO₂

Dióxido de carbono

CSV

Valores separados por comas.....

E

EE. UU.

Estados Unidos

EPA

Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)

H

HVAC

Heating, Ventilation, and Air Conditioning (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado)

I

IA

Inteligencia Artificial

IDA

Indoor Air (calidad de Aire)

IoT

Internet Of Things (internet de las cosas)

K

KPI

Key Performance Indicator (indicador clave de rendimiento)

L

LC-ZEB

Life Cycle Zero Energy Building (edificios de Energía Cero durante su Ciclo de Vida).....

LEED

Leadership in Energy and Environmental Design

M

MICA

Monitor Inteligente de Calidad de Aire Interior

ML

Machine Learning (aprendizaje automático).....

N

NOx

Óxidos de Nitrógeno.....

NTC

Negative Temperature Coefficient (Coeficiente negativo de temperatura)

NZEB

Nearly Zero Energy Building (edificios con consumo de energía casi nulo)

O

ODS

Objetivos de Desarrollo Sostenible

OMS

Organización Mundial de la Salud

P

PEB

Positive Energy Building (edificio de Energía Positiva)

PM

Particulate Matter (materia particulada)

PM₁

Partículas con diámetro aerodinámico inferior a 1 µm

PM₁₀

Partículas con diámetro aerodinámico inferior a 10 µm

PM_{2.5}

Partículas con diámetro aerodinámico inferior a 2.5 µm

PM₄

Partículas con diámetro aerodinámico inferior a 4 µm

R

RFA

Rebreathed Fraction of Air (proporción de aire previamente respirado)

RITE

Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.....

S

SB

Smart Building (edificio Inteligente)

SIGEYZ

Sistema de Gestión de Espacios de la Universidad de Zaragoza.

SRI

Smart Readiness Indicator.....

T

TVOC

Compuestos Orgánicos Volátiles Totales(Total Organic Compounds)

U

UE

Unión Europea.....

V**VOC**

Volatile Organic Compounds (Compuestos Orgánicos Volátiles)

W**WELL**

WELL Building Standard.....

Z**ZEB**

Zero Energy Buildings (edificios con consumo energético nulo)

Listado de figuras

Figura 1. Diferentes niveles de edificios cero emisiones. Fuente: [7] adaptada de [6].....	10
Figura 2. Requerimientos para lograr edificios de consumo casi nulo (NZEB). Fuente: Elaboración propia basado en la norma ISO 52000-1.	11
Figura 3. Ejemplo de temperaturas de consigna por horas en modo refrigeración con preenfriamiento. Fuente: [23].....	13
Figura 4. Nº de sondas de temperatura instaladas por campus.	16
Figura 5. a) Temperatura (°C) y zona de estudio para un día. b) Ajuste de valores de temperatura (°C) de la zona de estudio a una recta.....	16
Figura 6. Esquema del programa Matlab. Elaboración propia.	17
Figura 7. Fuentes de datos del visor Power Bi. Elaboración propia.	18
Figura 8. Ejemplo de gráfico de cajas y bigotes del promedio de pendientes por fecha y edificio del Campus Río Ebro.	18
Figura 9. Ejemplo de cálculo de pendientes y promedios por sensor o por fecha. Edificios SAI – Campus San Francisco....	19
Figura 10. Ejemplo de fuerte correlación temperatura exterior - pendientes. Edificio Torres Quevedo.	20
Figura 11. Ejemplo de edificio con fuerte correlación con la temperatura interior - pendientes. Facultad de Medicina B... .	20
Figura 12. Ejemplo de correlación fuerte día de la semana-pendientes. Edificio UTCE.....	21
Figura 13. Evolución de las pendientes en una semana.....	21
Figura 14. Ejemplo de gráfico de cajas y bigotes del promedio de pendientes por fecha y edificio del Campus Río Ebro con comparativa por años.....	21
Figura 15. Correlación potencia instalada HVAC por metro cuadrado frente a promedio de pendientes.	22
Figura 16. Valores promedio de pendientes por edificio y mes, en 2023-24 y número de pendientes totales calculadas....	24
Figura 17. Coeficientes de determinación por edificios y tipo de gráfica.	25
Figura 18. Ejemplo de desfase de 30' entre el arranque y el aumento de la temperatura interior. Edificio UTCE.	26
Figura 19. Ejemplo de desfase de 10' entre el arranque y el aumento de la temperatura interior. Edificio CTA.....	26
Figura 20. Esquema del planteamiento de algoritmo para la planificación del horario de arranque.....	26
Figura 21. Proceso del estudio.	28
Figura 22. Porcentaje de tiempo (por equipo) en horario de ocupación con el CO ₂ en distintas franjas.	29
Figura 23. Porcentaje de tiempo (por equipo) en horario de ocupación con el TVOC en distintas franjas.	30
Figura 24. Representación conjunta de TVOC y CO ₂ . Ejemplo de alta correlación.....	30
Figura 25. Representación conjunta de TVOC y Temperatura. Ejemplo de alta correlación.	30
Figura 26. Porcentaje de tiempo (por equipo) en horario de ocupación con el formaldehído en distintas franjas.	31
Figura 27. Rangos de temperaturas según normativa para los sistemas de climatización.	32
Figura 28. Comparativa de edificios. Ejemplo 26 de enero de 2024 entre las 9 y las 10 h.	32
Figura 29. Evolución del porcentaje de tiempo en distintas franjas de temperatura por hora. Edificio Torres Quevedo (26/01/2024).	32

Relación de este trabajo con los ODS

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 propuestos por Naciones Unidas [1], manifiestan el compromiso con los valores medioambientales por parte de naciones e instituciones. Este trabajo está plenamente ligado a los ODS, especialmente en términos de salud y eficiencia energética. En concreto, se han seleccionado los ODS más representativos, junto con los puntos más relacionados con este trabajo en la tabla 1.

Objetivo de Desarrollo Sostenible		Descripción
Objetivo 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades.		3.3 Combatir enfermedades transmisibles 3.4 Promover el bienestar 3.9 Reducir el número de muertes y enfermedades por la contaminación del aire
Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos.		7.3 De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética
Objetivo 11: Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles		11.6 De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo de las ciudades, prestando especial atención a la calidad del aire 11.c Proporcionar apoyo [...] para construir edificios sostenibles y resilientes utilizando materiales locales
Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos		13.3 Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana

Tabla 1. ODS relacionados con este TFM.

Contexto del TFM

La línea de trabajo de este TFM comenzó en 2022 con el TFG sobre ventilación y eficiencia energética en los edificios de la EINA. Este trabajo se centró en el estudio del funcionamiento de la ventilación mecánica del edificio Betancourt (EINA) y en el análisis de datos de consumos eléctricos y de calidad de aire (temperatura, CO₂, etc.). Durante el curso 2022-23, al recibir una **Beca de Colaboración** en el Departamento de Ingeniería Mecánica, continué trabajando en esta línea compatibilizándolo con los estudios del Máster en Ingeniería Industrial. Durante la beca, se publicó un artículo en la revista Energy and Buildings titulado *Is IoT monitoring key to improve building energy efficiency? Case study of a smart campus in Spain*. Asimismo proseguí con el análisis de datos de calidad de aire, tanto en la EINA como en un hospital y en dos residencias de mayores (ver informes en el anexo).

Durante el curso actual 2023-24, he estado trabajando en la Unidad Técnica de Construcciones y Energía de la Universidad de Zaragoza (Oficina Verde), al obtener la **beca de apoyo para la gestión, monitorización y reducción del consumo de energía primaria de los espacios**. A lo largo de este tiempo, he aprendido a manejar la herramienta Power BI, avanzando en el análisis y visualización de grandes volúmenes de datos (temperaturas, consumos eléctricos, etc.), para conocer gracias a ellos el comportamiento de los edificios y sus instalaciones, y poder plantear la toma de decisiones encaminadas a conseguir un ahorro de energía. También he podido acceder al sistema de gestión “SCADA” desarrollado por el servicio de mantenimiento y a más información acerca de los edificios de la Universidad de Zaragoza y sus instalaciones.

La metodología llevada a cabo desde el TFG ha consistido en la realización de informes con los análisis realizados o sugerencias de mejora. En el anexo de este TFM, se recogen los informes redactados tras el TFG, cuyo listado se muestra en la tabla 2. Dado que, por la extensión de la memoria, no se puede abordar todo el trabajo realizado, este TFM se centra principalmente en los resultados más relevantes de esta última etapa (**informes 22 al 25**).

INFORMES TFM POR ORDEN CRONOLÓGICO	Año
15. Estudio sobre monitorización en espacios EINA. Septiembre 2022 a enero 2023	2022-23
16. Propuesta de monitorización de una Unidad de Tratamiento de Aire	2022-23
17. Estudio sobre COVs y salud en espacios EINA.	2022-23
18. Estudio sobre monitorización biblioteca EINA. 15 de noviembre 2022 a 15 de febrero 2023	2022-23
19. Estudio sobre monitorización cafetería Ada Byron EINA. 15 de noviembre 2022 a 15 de febrero 2023	2022-23
20. Propuesta de optimización del encendido de climatizadores de aulas	2022-23
21. Estudio de temperaturas en espacios del edificio Betancourt. Noviembre de 2022. Líneas de futuro	2022-23
22. Metodología para la caracterización de la inercia térmica de edificios, mediante el estudio de las pendientes de ascenso de temperatura.	2022-23
Informe IAQ hospital sala 1 e Informe IAQ hospital sala 2	2023-24
Informe IAQ residencia 1 e Informe IAQ residencia 2	2023-24
23. Calidad de aire en el edificio de Filosofía y Letras.	2023-24
24. Metodología para la caracterización de la inercia térmica del conjunto edificio e instalaciones de climatización de edificios, mediante el estudio de las pendientes de ascenso de temperatura durante el encendido del sistema HVAC en modo calefacción.	2023-24
25. Metodología para el análisis de los datos de temperatura de los edificios. Confort y eficiencia energética.	2023-24

Tabla 2. Listado de informes disponibles en los anexos.

Introducción y revisión bibliográfica

Energía y edificios

Los edificios en la Unión Europea son responsables del 40% del consumo energético según la Comisión Europea [2], que estima que aproximadamente el 75% de ellos son energéticamente ineficientes. El hecho de que haya una alta proporción de **edificios ineficientes** es debido a la antigüedad del parque inmobiliario, anterior a la primera normativa sobre eficiencia energética de 2002 [3]. Además, la ineficiencia energética, va acompañado en muchos casos de una **falta de confort térmico**.

La Agencia Internacional de la Energía, así como la Alianza Mundial para los Edificios y la Construcción [4], [5] han trazado una hoja de ruta para avanzar hacia un escenario de cero emisiones netas en 2050 [6]. La **electrificación** y la adopción de **bombas de calor** para calefacción y refrigeración, desempeñará un papel fundamental en la transición energética [7].

En el ámbito de la edificación, el Parlamento Europeo ha aprobado recientemente (marzo de 2024) una nueva directiva que exigirá que, a partir de 2030, todos los edificios nuevos de la UE sean de cero emisiones (2027 para todos los edificios públicos nuevos) [8]. En edificios ya construidos, los países estarán obligados a la rehabilitación del 16 % de los edificios no residenciales menos eficientes para 2030 y del 26 % para 2033, con requisitos mínimos de eficiencia energética [8].

Como se ilustra en la figura 1, el proceso para **conseguir edificios con cero emisiones netas de carbono** [7] comienza con que los edificios construidos cuenten con un nivel de eficiencia energética muy alto, de modo que requieran una cantidad muy baja de energía para su funcionamiento. A estos edificios se les denomina *edificios de consumo de energía casi nulo* (NZEB). Posteriormente, gracias a la implementación de energías renovables, pueden pasar a ser *edificios de energía cero* (ZEB), si pueden cubrir sus necesidades de energía, o *edificios de energía positiva* (PEB), si producen más energía de la que consumen. Ello permite, finalmente, avanzar hacia el concepto de *edificio de energía cero durante el ciclo de vida* (LC-ZEB).

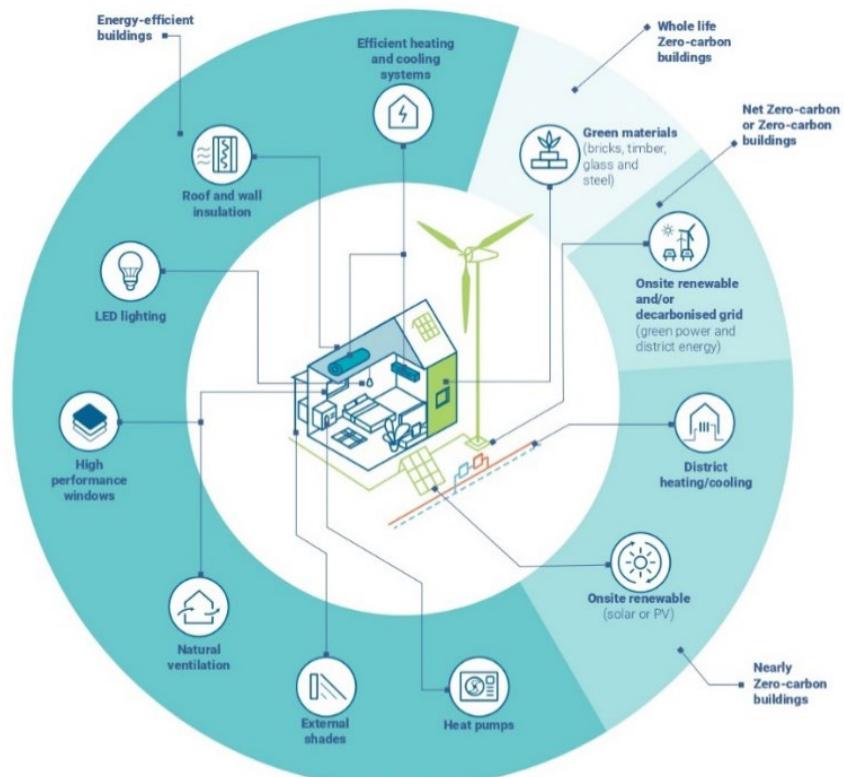


Figura 1. Diferentes niveles de edificios cero emisiones. Fuente: [7] adaptada de [6]

Los requerimientos para lograr edificios de consumo de energía casi nulo (NZEB) quedan recogidos en la norma UNE-EN ISO 52000-1:2019 [9], que establece el siguiente orden de prioridad, esquematizado en la figura 2.

En primer lugar, la **disminución de las demandas energéticas** (estructura del edificio). Incluye la calidad de la envolvente del edificio (aislamiento, ventanas, etc.); el diseño bioclimático (p.ej. iluminación natural); la **inerzia y la zonificación**; la necesidad de garantizar **condiciones medioambientales interiores adecuadas** para evitar posibles efectos negativos, tales como una mala **calidad del aire interior** a causa de ausencia de ventilación o problemas higrotérmicos tales como el moho.

En segundo lugar, la mejora de la **eficiencia energética** de los sistemas técnicos del edificio (p. ej. instalaciones de HVAC y agua caliente sanitaria o iluminación).

En tercer lugar, la contribución de las energías procedentes de fuentes **renovables**, como por ejemplo los sistemas solares activos o los sistemas de calefacción y de refrigeración urbanos o colectivos con renovables (biomasa, gases renovables, recuperación de calor de procesos industriales, etc.).



Figura 2. Requerimientos para lograr edificios de consumo casi nulo (NZEB). Fuente: Elaboración propia basado en la norma ISO 52000-1.

Para una evaluación de la eficiencia energética de los edificios y para alcanzar los objetivos de ahorro de energía, el estudio llevado a cabo por Li et al. en 2019 [10] define un nuevo conjunto de **KPI** a nivel de sistema, con el fin de suprir la falta de métodos de evaluación y métricas adecuados para ello. Los indicadores propuestos abarcan cuatro grandes sistemas de uso final en los edificios: iluminación; cargas eléctricas diversas; calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC); y agua caliente sanitaria. Además, la creciente instalación de sensores y contadores en los edificios hace que la evaluación del rendimiento de los edificios a nivel de sistema sea más factible gracias a una mejor recogida de datos.

Edificios inteligentes

Con los recientes avances en análisis de datos, aprendizaje automático (Machine Learning, ML), tecnologías de sensores e internet de las cosas (Internet Of Things, IoT), hay una apuesta por las **soluciones inteligentes** en los edificios. El término **edificio inteligente** (Smart Buildings, SB) se adoptó en la revisión de la Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios (EPBD) 2018/844/UE, para fomentar la eficiencia energética de los edificios [11]. Los edificios inteligentes son una integración del IoT en los sistemas de automatización de los edificios (Building Automation Systems, BAS) [12], incluyendo sensores, actuadores, control inteligente, redes y comunicaciones y plataformas de software. La principal ventaja, es que con unas modificaciones infraestructurales mínimas, es posible convertir cualquier edificio en inteligente de forma rentable [13], dado que con una relativamente baja inversión, el potencial de ahorro de energía en los edificios es elevado.

En un edificio inteligente, los sensores recopilan datos en tiempo real del edificio, lo que permite implementar algoritmos inteligentes para ajustar automáticamente la configuración de estos sistemas. La **capacidad de aprendizaje de los edificios**, es decir, la capacidad de un edificio para recopilar datos sobre su entorno y su funcionamiento interno, y de utilizar esta información para ajustar sus sistemas y mejorar su rendimiento con el tiempo es muy importante para su adaptabilidad [14]. Este aprendizaje, puede permitir realizar ajustes automáticamente sin intervención

humana directa, garantizando una respuesta rápida y eficiente a cambios en las condiciones del entorno y en los patrones de uso del edificio, permitiendo maximizar la eficiencia energética y el confort de los ocupantes. En este aspecto, a través de algoritmos de aprendizaje automático, la inteligencia artificial tiene un papel importante. En cuanto a la utilización largos conjuntos de datos procedentes de un edificio para el entrenamiento de IA, Alanne et al. [14] insiste en la necesidad de soluciones que puedan adaptarse rápidamente a las condiciones cambiantes del edificio. De forma que sea capaz de detectar cuándo ha habido cambios en las condiciones, evitando trabajar con datos obsoletos.

Además del concepto de edificios inteligentes, la Comisión Europea introdujo mediante la misma directiva en el año 2018 [11], el marco de implementación del Indicador ***Smart Readiness Indicator (SRI)*** [15]. El SRI es un parámetro que califica la preparación inteligente de los edificios en función de su capacidad para realizar tres funcionalidades clave: optimizar la eficiencia energética y el rendimiento general en uso; adaptar su funcionamiento a las necesidades del ocupante; y adaptarse a las señales de la red (por ejemplo, flexibilidad energética) [16]. Por otra parte, el SRI informa a los propietarios o gestores de los edificios sobre el nivel de automatización y monitorización de los sistemas del edificio, con el objetivo de incentivar la adopción de tecnologías inteligentes [17].

La importancia de la regulación para lograr que los edificios sean energéticamente eficientes queda reflejada en la nueva Norma UNE-EN ISO 52120-1 “*Eficiencia energética de los edificios. Contribución de la automatización, el control y la gestión de los edificios*”. Esta norma define las funciones de control, de automatización y de gestión técnica de los edificios que contribuyen a la eficiencia energética de los mismos y establece los requisitos mínimos que deberían implementarse en edificios de diferentes perfiles de uso. También ofrece métodos basados en factores para evaluar el efecto de estas funciones en un determinado edificio.

Un ejemplo de ello es la metodología de diseño de un sistema automatizado para mejorar el rendimiento térmico de un gran edificio en funcionamiento [18] en la Universidad de Extremadura. La metodología consta de dos etapas. En la primera etapa, se lleva a cabo una evaluación y diagnóstico para establecer las funciones adecuadas tanto para las redes de comunicación abiertas (normas EN ISO 52120-1 y EN 50090), como para asignar la gestión técnica del edificio (EN ISO 52120-1). En la segunda etapa, tiene lugar el despliegue de dispositivos de entrada y salida de bajo coste y bajo consumo para el control del sistema. Mediante esta metodología, han demostrado que es posible automatizar eficazmente un edificio obsoleto con un sistema de bajo coste y de código abierto que puede aplicarse fácilmente a otros edificios.

Dado el importante número de edificios del sector terciario (universidades) que carecen de **sistemas de regulación y control** y con el fin de incentivar la renovación de los sistemas más antiguos, se ha regulado la posibilidad de monetizar los ahorros de energía conseguidos mediante la implementación de sistemas de regulación y control por la obtención de certificados de ahorro energético [19]. Un **Certificado de Ahorro Energético (CAE)** es un documento electrónico que garantiza que, tras llevar a cabo una actuación de eficiencia energética, se ha conseguido un nuevo ahorro de energía final equivalente a 1 kWh. Ello permite recuperar parte del coste de las inversiones en eficiencia energética, ya que el usuario final podrá recibir una contraprestación económica [20].

Gestión de sistemas HVAC en edificios

En edificios del sector terciario, los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) representan una **proporción significativa del consumo total de energía**, pudiendo implicar aproximadamente la mitad del consumo total del edificio [21]. Por este motivo, es fundamental un control óptimo de estos sistemas, con el objetivo de mantener una calidad satisfactoria del ambiente interior (IEQ) en estancias individuales con un uso mínimo de energía del sistema HVAC [22].

En este aspecto, Fadzli Haniff et al. [23] realiza una revisión de las técnicas básicas de programación de los **horarios** de los sistemas centrales de HVAC. Mencionar que, según Gupta et al. [12], un control descentralizado de HVAC funciona mejor que el control centralizado a medida que aumenta el número de estancias o edificios con diferencias en sus temperaturas de consigna y usos.

Las técnicas de programación según Fadzli Haniff et al. [23] pueden dividirse en tres clases principales:

La técnica de programación básica implica únicamente la manipulación de los **estados de encendido y apagado** del sistema HVAC. Por ejemplo, mediante el apagado al mediodía en modo calefacción, al ser el momento de mayor temperatura exterior y menor ocupación, o bien mediante una desconexión anticipada antes del cierre, aprovechando la inercia del edificio.

La técnica de programación convencional se caracteriza por un **funcionamiento ininterrumpido** del sistema HVAC, manteniendo una temperatura de consigna menor por la noche en modo calefacción o mayor en modo refrigeración. De esta forma, en modo calefacción, no se deja enfriar los edificios en exceso y se aprovecha que el precio en tarifa nocturna es menor. Esta técnica puede suponer un mayor consumo de energía por el funcionamiento durante 24 horas del sistema. Una variante de esto consiste en un **preenfriamiento (refrigeración) o precalentamiento (calefacción)** **antes de que haya ocupación**, de modo que aprovechando la inercia del edificio, se almacena la energía térmica durante la madrugada y se va descargando durante las horas de ocupación. En la figura 3 se muestra un ejemplo para refrigeración.

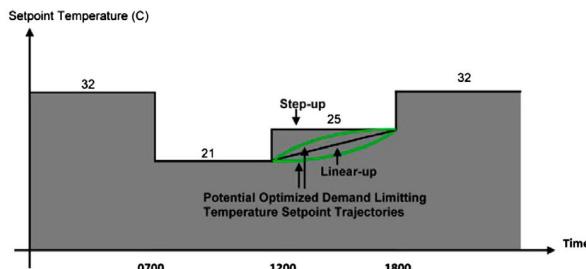


Figura 3. Ejemplo de temperaturas de consigna por horas en modo refrigeración con preenfriamiento. Fuente: [23]

Dakheel et al. [24], lleva a cabo una revisión de algunos estudios representativos en Smart Buildings relacionados con los sistemas de HVAC y distintas funciones implementadas con beneficios cuantificados. Entre ellos, para la **gestión de horarios** de funcionamiento de los sistemas, Zhang et al. [25] propone un controlador de temperatura óptimo basado en un modelo de control predictivo, adecuado para la optimización en línea de edificios inteligentes equipados con sensores. Integra la termodinámica del edificio, los datos de ocupación, la previsión meteorológica y HVAC, consiguiendo reducir el consumo energético en un 18,2 %.

Por otra parte, gracias a sistemas de monitorización, se puede llevar a cabo una detección de fallos o funcionamiento inadecuado del sistema HVAC como propone Shen et al. [26], con aviso a los operarios del edificio para que solucionen estos problemas. En este estudio, se probó dicho sistema en cuatro edificios piloto, mostrando un ahorro energético medio del 15%, con una amortización inferior a 12 meses.

El paso a un sistema de generación de electricidad baja en carbono, mediante la implantación de las renovables está reduciendo la flexibilidad de la generación, que depende de la disponibilidad de los recursos naturales en cada instante. El aumento de la **flexibilidad energética** desde el lado de la demanda, a través de la gestión de horarios de funcionamiento de las **bombas de calor**, es un componente potencialmente importante para garantizar la resistencia del sistema energético a bajo coste [27], [28]. En esta línea, Halvgaard et al. [29] propone un modelo predictivo utilizando los **precios de electricidad** en tiempo real para desplazar el consumo de electricidad de la bomba de calor a periodos con precios bajos de la electricidad, aprovechando la inercia térmica del edificio. De esta forma, el sistema de calefacción se convierte en un consumidor de energía flexible de la red, lo que además permite aprovechar los momentos en los que hay una mayor producción de energía renovable.

Tras la revisión bibliográfica realizada, se ha constatado que este es un tema de gran actualidad y relevancia. Se destaca la importancia de invertir esfuerzos en mejorar los sistemas de regulación y control, así como en desarrollar horarios optimizados basados en el análisis de datos experimentales para lograr ahorros significativos. También se ha evidenciado la falta de suficientes trabajos previos en esta línea específica, lo que justifica el planteamiento de este TFM.

Calidad de aire interior en edificios

Según la OMS, las personas permanecen entre un 80-90% del tiempo en el interior de espacios cerrados. Si no hay una ventilación adecuada, se produce una degradación del ambiente interior que conlleva a que la calidad del aire llegue a ser del orden de 2 a 5 veces peor que en el exterior, según la EPA (EE. UU.) [30]. Esto puede propiciar problemas de salud, generación de condiciones de alta transmisión de enfermedades respiratorias, así como pérdida de rendimiento cognitivo, disminuyendo la capacidad de realizar tareas que requieran pensamiento o concentración [31]. Distintos estudios [32] demuestran que, mejores tasas de ventilación aumentan el rendimiento en el lugar de trabajo y pueden reducir el absentismo hasta en un 35 % [33]. Algunos de los principales parámetros de la calidad del aire interior se resumen en la tabla 3 y son los siguientes:

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas inodoro, incoloro e insípido, cuya concentración en el exterior se sitúa en torno a 420 ppm [34]. Es exhalado durante la respiración por lo que, en ausencia de otras fuentes, es posible determinar el porcentaje de aire previamente respirado de un recinto en función del nivel de CO₂ (RFA, rebreathed fraction of air) de acuerdo con la siguiente correlación: $RFA = 0,0025 \cdot \Delta [CO_2] (ppm)$ [31]. Además, es posible utilizar su nivel relativo con respecto al exterior como un indicador indirecto de la ventilación y para estimar el riesgo potencial de transmisión de enfermedades aéreas [31], en espacios en los que la principal fuente de contaminación son los ocupantes. En este sentido, se publicó en enero de 2024 la norma UNE 171380:2024, sobre la medición en continuo de CO₂ en interiores para la prevención en salud y mejora del bienestar [35].

Por otra parte, para las concentraciones de dióxido de carbono relevantes en edificios (<5.000 ppm), se ha encontrado una correlación entre el valor absoluto de CO₂ y la aparición de síntomas tales como dolor de cabeza, fatiga o dolor de garganta [36].

La NTP 549 “El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior”, recomienda no superar los 1000 ppm de CO₂ [37]. El RITE [38] (Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios) presenta distintas **categorías de calidad del aire interior** (IDA), en función del uso de los edificios y establece los niveles de CO₂ en función de la calidad de aire interior: IDA 1 (ocupantes sensibles): 770 ppm; IDA 2 (ocupación permanente): 920 ppm; e IDA 3 (ocupación temporal): 1.220 ppm.

La materia particulada (PM) se define como el conjunto de partículas sólidas o líquidas (salvo el agua pura) presentes en suspensión en el aire [39]. Son una mezcla compleja de sustancias que presentan un tamaño variable entre 0,005 y 100 µm y no pueden detectarse a simple vista [40]. La normativa y los métodos de muestreo de PM clasifican las partículas en función de su diámetro aerodinámico:

- Partículas gruesas, cuyo diámetro aerodinámico es mayor a 10 µm (PM10)
- Partículas finas (PM1.0, PM2.5 o PM10) que comprenden a las partículas con diámetro aerodinámico menor a 1, 2, 5 y 10 µm, respectivamente.

Las partículas más pequeñas tienen una mayor capacidad para permanecer suspendidas en el aire, lo que aumenta la probabilidad de ser inhaladas [31]. Además, su peligrosidad se incrementa debido a que pueden penetrar más fácilmente en las vías respiratorias, lo que puede ocasionar problemas pulmonares, daño en el sistema cardiovascular o disfunciones en los sistemas reproductivos y nervioso central. Adicionalmente, las partículas proporcionan superficies a las que los aerosoles (virus, bacterias, hongos, etc.) pueden adherirse, facilitando la transmisión de enfermedades respiratorias [31]. La OMS recomienda no superar los siguientes valores: 15 µg/m³ en 24h (PM_{2.5}) y 45 µg/m³ en 24h (PM₁₀). El método más eficaz para retener en un espacio interior la PM y reducir su concentración en el aire interior es la filtración [41].

Los compuestos orgánicos volátiles (VOC) son compuestos químicos orgánicos que se encuentran en estado gaseoso a temperatura ambiente o son muy volátiles a dicha temperatura. Se puede considerar como VOC aquel compuesto orgánico que a 20°C tenga una presión de vapor de 0.01 kPa o más, o una volatilidad equivalente en las condiciones particulares de uso y un punto de ebullición entre 50 y 260°C [42]. Pueden tener efectos adversos sobre la salud humana, dado que algunos de ellos son tóxicos o cancerígenos y pueden ser absorbidos por el organismo fácilmente por inhalación [31]. Las familias de VOC más destacadas son los hidrocarburos aromáticos como el benceno o el

tolueno, así como los aldehídos, destacando el formaldehído por su alta prevalencia en los ambientes interiores. El origen de estos compuestos en el interior de los edificios viene dado tanto por las actividades de los ocupantes por el uso de productos de limpieza, ambientadores, perfumes, etc., así como por materiales de construcción o de decoración: productos de madera con resinas, adhesivos, pinturas, barnices, mobiliario, etc. [31] Según [43], se considera que una concentración total de compuestos orgánicos volátiles es normal cuando está por debajo de 360 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que niveles por encima de 1572 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ requieren atención.

Otro contaminante interior es el **ozono**, que se genera normalmente en exteriores como consecuencia de reacciones químicas en presencia de VOCs y NOx y de radiación solar, y entra a los espacios interiores junto con el aire ventilado [44]. Los aparatos eléctricos como fotocopiadoras o dispositivos desinfectantes también son otra fuente de ozono.

El **radón** es otro contaminante que afecta la calidad del aire interior. Se origina en el suelo y se infiltra en los edificios a través de materiales porosos, grietas y otras aberturas, especialmente en las zonas de mayor riesgo como la sierra de Madrid, Segovia, Ávila, Cáceres, Salamanca y gran parte de Galicia [45]. Es la segunda causa principal de cáncer de pulmón después del tabaquismo [46].

Parámetros	Fuentes habituales en edificios	Límites recomendados
Dióxido de carbono, CO₂	Ocupantes: respiración	CO ₂ : 1000 ppm (NTP 549) [37]
		IDA 1: 770 ppm (RITE [38]) IDA 2: 920 ppm (RITE) IDA 3: 1.220 ppm (RITE)
Material particulado, PM	Polvo, polen, humo	PM _{2.5} : 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24h (OMS [47]) PM ₁₀ : 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24h (OMS)
Compuestos orgánicos volátiles, VOC	Ocupantes: productos de limpieza, ambientadores, perfumes, etc. Materiales de construcción: madera con resinas, adhesivos, pinturas, barnices, mobiliario, etc.	TVOC: < 1572 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (AGÖEF [43])
Ozono	Reacciones químicas en presencia de VOCs y NOx y de radiación solar. Fotocopiadoras o dispositivos desinfectantes.	O ₃ : 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ /día (OMS [47])
Radón	Rocas y los suelos (geología hercínica)	Radón < 300 Bq/m ³ [46]

Tabla 3. Tabla resumen de contaminantes, fuentes y niveles. Elaboración propia.

Por tanto, es importante la implementación de un sistema de **monitorización continua de calidad del aire interior**, ya que permite:

- Optimizar el uso de los sistemas HVAC. Al integrar la monitorización de calidad de aire con los sistemas de gestión de edificios existentes, es posible actuar sobre los sistemas de ventilación mecánica, incrementando o disminuyendo el caudal de renovación de aire según las necesidades de ventilación en cada momento.
- Conocer los niveles de los parámetros más representativos en tiempo real e identificar patrones y tendencias.
- Detectar niveles elevados de contaminantes e implementar medidas para mitigar estos riesgos, garantizando la salud de los ocupantes y el cumplimiento de las recomendaciones y normativas.
- Mejorar el confort, el bienestar y la productividad de los usuarios. En particular, mejorar el rendimiento académico y la atención de los estudiantes.
- Obtener puntos en sellos y certificaciones de sostenibilidad de edificios como WELL, LEED o BREEAM, que evalúan la eficiencia energética, el uso de agua responsable, materiales sostenibles y **calidad ambiental interior** [48].

La monitorización en continuo de calidad de aire interior es esencial para promover entornos seguros y confortables, sin embargo, sigue siendo subestimada en muchos contextos. Por ello, se ha considerado relevante llevar a cabo un estudio en este ámbito, que muestre el potencial de los datos para garantizar la salud y el bienestar de los ocupantes.

1. Caracterización de la inercia térmica

En los edificios de la Universidad de Zaragoza, los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) representan una proporción muy significativa del consumo total de energía. Por ello, con el fin de contribuir a la eficiencia energética, desde el proyecto **sensoUZ** (sensorizar.unizar.es) se ha dado el primer paso para convertir los edificios de la universidad en **edificios inteligentes**, monitorizando en tiempo real parámetros de calidad ambiental. El despliegue de la infraestructura de sensores comenzó en los edificios de la EINA y se está extendiendo, bajo el impulso del *Servicio de Mantenimiento y el Vicerrectorado de Planificación, Sostenibilidad e Infraestructuras*, al resto de edificios de la Universidad de Zaragoza (ver figura 4), contando con más de 400 equipos de medida. En concreto, la **monitorización de la temperatura del interior** de los edificios permite analizar el grado de confort en los edificios y verificar la idoneidad de los horarios de climatización.

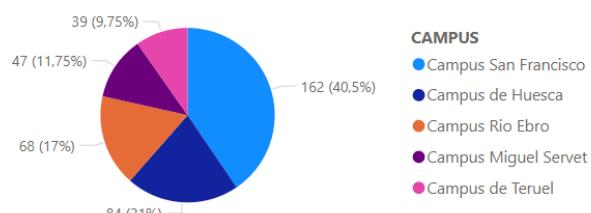


Figura 4. Nº de sondas de temperatura instaladas por campus.

En la actualidad, los horarios de los sistemas de climatización se establecen en base a la previsión meteorológica, con una antelación de 24-48 h, sin tener en cuenta el comportamiento térmico de cada edificio en particular. Uno de los objetivos de este trabajo es **caracterizar la inercia térmica de los edificios junto con sus instalaciones de climatización en modo calefacción**. Con los resultados de esta caracterización, se valorará la viabilidad de establecer un horario de encendido de la climatización distinto, según el comportamiento térmico de cada edificio y la capacidad de los sistemas de climatización instalados, garantizando la eficiencia energética y el confort térmico.

Para caracterizar la inercia térmica del conjunto edificio e instalaciones en el arranque de los sistemas de climatización en modo calefacción, se ha propuesto una **metodología** en base al análisis de los registros de temperatura interior de los edificios (mayoritariamente sensores de temperatura del tipo NTC). Consiste en el diseño de un programa en **Matlab** que, en el intervalo comprendido entre las 5 y las 9 de la mañana, detecta si ha habido un aumento de temperatura por encima de cierto umbral, en un número suficiente de medidas consecutivas. Posteriormente, en estas franjas, el **programa calcula las pendientes de ascenso de la temperatura (°C/h) mediante el ajuste a una recta**.

A modo de ejemplo del funcionamiento del programa, en la figura 5 se representa para un día de diciembre, la evolución de la temperatura en el interior de uno de los edificios y la zona de estudio en la que se ha detectado un aumento de la temperatura. Por otra parte, se muestra el ajuste de las temperaturas del arranque a una recta.

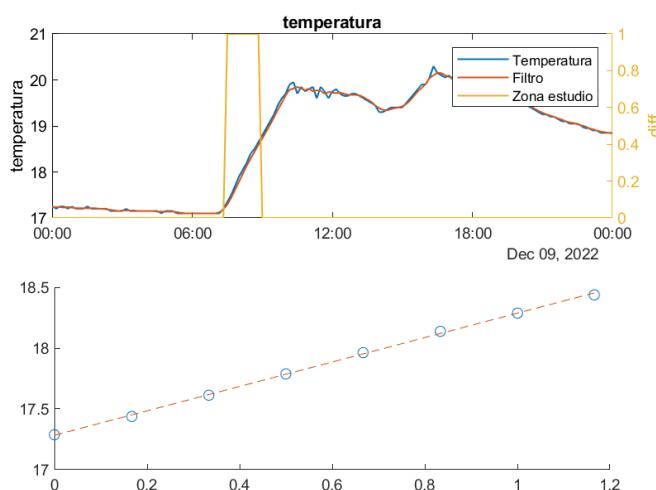


Figura 5. a) Temperatura (°C) y zona de estudio para un día. b) Ajuste de valores de temperatura (°C) de la zona de estudio a una recta.

En este capítulo se abordará, en primer lugar, el programa de Matlab diseñado para el cálculo de las pendientes de ascenso de la temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$). A continuación, se explicará brevemente el visor Power Bi desarrollado para el análisis de los datos, así como algunas de las causas que influyen en las pendientes a lo largo del tiempo en los edificios y las correlaciones realizadas. Se analizarán algunos de los resultados, clasificando los edificios según el promedio de las pendientes obtenidas. Finalmente, se presentará una propuesta sobre cómo podrían establecerse los horarios y se explicará por qué se ha optado por un modelo experimental en lugar de uno físico mediante simulación. Para más información consultar los informes 22 y 24 en el anexo.

El esquema del programa de **Matlab** se muestra en la figura 6 y consta de los siguientes apartados:

1. **Descarga en CSV de registros de temperatura de base de datos:**
 - a. **Descarga de los datos temperatura:** A partir de un listado de sondas de temperatura clasificadas por código de espacio SIGEYZ (<https://sigeuz.unizar.es/>), el programa descarga de la base de datos los últimos registros de temperatura en CSV, desde la última fecha guardada.
 - b. **Tratamiento de los datos de temperatura:** Se eliminan datos duplicados y se interpola para obtener los datos espaciados regularmente cada 10 minutos a horas en punto (por ejemplo 10:00, 10:10, 10:20...).
2. **Detección de franjas de ascenso de la temperatura y cálculo de las pendientes** para cada espacio.
 - a. **Filtrado de la señal de temperatura:** Para evitar datos anómalos puntuales (errores de medida, medidas puntuales que cambian la tendencia, etc.), se lleva a cabo un suavizado de la señal de temperatura, mediante la utilización de un filtro de media móvil. En la figura 5, se puede observar el efecto del filtro.
 - b. **Selección de datos con alta variación de temperatura:** Se realiza la diferencia entre valores consecutivos de temperatura (ΔT). Si dicha diferencia es mayor a un valor establecido (ΔT_{\min} de 0,05 C) y los valores se encuentran en la franja de 5 de la madrugada a 9 de la mañana (franja de encendido de los sistemas HVAC), se registra un 1 en una nueva variable (indicadora de alto gradiente).
 - c. **Franja de estudio:** Si es superior a 8 el número de registros consecutivos con delta de temperatura alto (variable indicadora de alto gradiente es 1), el programa detectará franja de estudio. Se seleccionará una única franja de estudio por día.
 - d. **Cálculo de las pendientes:** Para cada franja de estudio, el programa realiza el ajuste de los datos de temperatura a una recta y calcula la pendiente.
3. **Exporta datos de pendientes.** Se guardan los valores de pendientes diarios, junto con la hora y temperatura interior en el inicio de la franja de estudio.

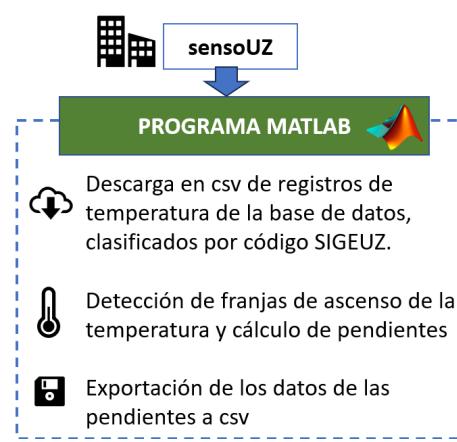


Figura 6. Esquema del programa Matlab. Elaboración propia.

En el informe 22 (anexo), se detalla el funcionamiento del código para la detección de las franjas de ascenso de la temperatura y cálculo de las pendientes.

Posteriormente, con el fin de analizar los datos de las pendientes calculadas y de poder llevar a cabo distintas correlaciones con otras fuentes de datos, **se ha desarrollado un visor Power Bi** disponible en el siguiente [enlace](#). En la figura 7 se ha representado un esquema con los registros que utiliza y devuelve el programa de Matlab, así como los registros y otra información que es suministrada al visor Power Bi. En el informe 24, se explica detalladamente el contenido del visor Power Bi y de cada una de las pantallas. A continuación, se detallarán los aspectos más relevantes.

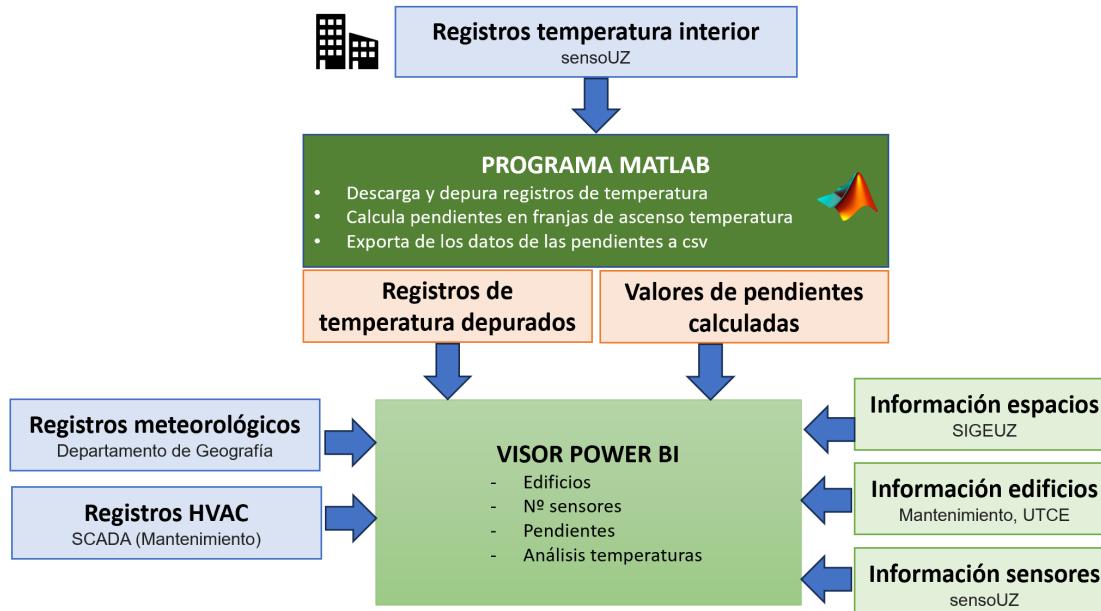


Figura 7. Fuentes de datos del visor Power Bi. Elaboración propia.

Con el fin de estudiar la **variabilidad de las pendientes** en un mismo edificio y entre edificios, se ha desarrollado una de las pantallas del visor (pendientes/Cajas-bigotes pendiente), en la que se representan gráficamente las pendientes por edificio mediante un diagrama de cajas y bigotes. En la figura 8 se muestra un ejemplo para el Campus Río Ebro. Los diagramas de cajas y bigotes permiten visualizar la mediana, los cuartiles de los datos (caja), los extremos superior e inferior (bigotes) y también los valores atípicos (por encima/debajo de los bigotes). En el caso del análisis de las pendientes, a mayor anchura de la caja, que es donde se concentran los valores más frecuentes, habrá un mayor número de factores de influencia (mayor dispersión).

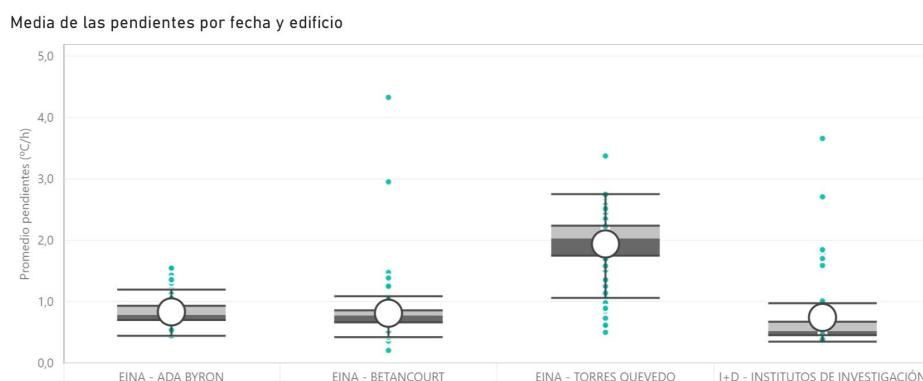


Figura 8. Ejemplo de gráfico de cajas y bigotes del promedio de pendientes por fecha y edificio del Campus Río Ebro.

Para la realización de este tipo de gráficos, se utiliza el promedio diario de las pendientes de todos los sensores en los que se haya calculado (columna de la derecha en la figura 9, en color marrón). De esta forma se puede ver si las pendientes se mantienen estables a lo largo del tiempo o si existe mucha variación. Por otra parte, la ventaja de agrupar por días, frente a agrupar por sensores, es que el gráfico se elabora con un mayor número de datos y es menos probable que un dato erróneo introduzca demasiado error. Los datos atípicos pueden ser debidos a días en los que sólo se ha calculado pendiente en unos pocos espacios y que no se haya calculado correctamente la pendiente en alguno de ellos.

Time	ADMINISTRACIÓN SAI	DESPACHO 37	DESPACHO 39	SALA N° 14-2	SIMULACIÓN CONTROL	UNIDAD ADMINISTRATIVA SAI	Total
05/02/2024	0,60	0,85	0,73	0,83	0,81	0,81	0,77
06/02/2024	0,92	0,50		0,85	1,00	0,87	0,83
07/02/2024	1,03	1,16	0,84	0,90	0,80	0,88	0,93
08/02/2024	1,37	2,07	3,28	0,50	0,40	2,51	1,69
09/02/2024	0,79	0,81	1,12	0,67	0,30	2,76	1,07
12/02/2024	1,56	1,65	2,40	0,72	0,40	2,10	1,47
13/02/2024	1,32	1,30	0,59	0,83	0,35	2,44	1,14
14/02/2024	1,32	0,88		0,72	0,39	2,48	1,16
15/02/2024	0,54	0,99		0,76	0,37	3,00	1,13
16/02/2024	0,86	1,13		0,85	0,38	2,65	1,17
19/02/2024	1,29	1,38	0,87	0,75	0,42	2,35	1,18
20/02/2024	1,25	1,00		0,87		2,06	1,29
21/02/2024	0,89	1,38		0,82	0,28	2,08	1,09
Total	1,15	1,25	1,13	0,77	0,48	2,38	1,24

Figura 9. Ejemplo de cálculo de pendientes y promedios por sensor o por fecha. Edificios SAI – Campus San Francisco.

Como se ha observado en el ejemplo de la figura 8, existe dispersión en los datos de pendientes. Por ello, se han llevado a cabo distintas correlaciones para investigar los motivos por los que existe variación en las pendientes a lo largo del tiempo para un mismo edificio. También se han investigado las posibles causas que hacen que haya distinto comportamiento entre los diferentes espacios o estancias en un mismo edificio.

Si se aplica un balance de energía de sistemas abiertos al aire del interior del edificio, la variación de la energía almacenada en dicho aire (inercia, proporcional a la variación de la temperatura interior) dependerá de las entradas y salidas de energía a través de la frontera que rodea el aire interior. Estas entradas y salidas se producirán en forma de calor (conducción, convección y radiación) y a través de los flujos de materia que entran y salen (infiltraciones, exfiltraciones, caudales de aire de los equipos de secundario de climatización exceptuando los caudales recirculados). Por tanto, la inercia (variación más rápida o lenta de la temperatura del aire interior) se verá influida por todos los factores que alteren las transferencias de calor a través de los cerramientos o con las unidades terminales y las condiciones de los flujos de materia que interaccionan con el aire interior

Algunas de las **causas de la variación de las pendientes a lo largo del tiempo en un edificio son las siguientes:**

- **Temperatura exterior:** Afecta a la demanda de energía térmica asociada con las pérdidas a través de los cerramientos y la ventilación. En la mayoría de los edificios estudiados, la pendiente aumenta a menores temperaturas exteriores. Esto se explica dado que, a menor temperatura exterior, el gradiente térmico (diferencia entre la temperatura de impulsión y la temperatura exterior) será mayor, lo que provoca que la pendiente de ascenso de la temperatura también sea también mayor (aunque la temperatura de impulsión sea constante). Además, según han informado y se constata en las mediciones de temperatura, en ciertos sistemas de calefacción, la temperatura de impulsión se regula según la temperatura exterior. En estos casos, a menor temperatura exterior, se incrementa la temperatura de impulsión, lo que resulta en pendientes de ascenso de la temperatura interior aún mayores.

Se han correlacionado los valores del promedio de pendientes en función de la temperatura exterior en una de las pestañas visor (pendientes/Correlación temperatura exterior-pendiente). De los edificios de Zaragoza, 2 presentan fuerte correlación ($>0,8$) entre las pendientes y la temperatura exterior al comienzo de la franja de estudio, 3 correlación media en el intervalo $(0,6-0,8]$, 9 correlación débil $(0,4-0,6]$ y 15 no presentan correlación. Un ejemplo de edificio con alta correlación con la temperatura exterior es el Torres Quevedo, como se observa en la figura 10, en el que la variación de las pendientes con la temperatura exterior es amplia (entre 0,5 y 2,5). Consultando con el Servicio de Mantenimiento, este edificio cuenta con regulación de temperatura de impulsión en función de la temperatura exterior, lo que podría ser la causa de tan alta correlación. Sin embargo, pocos edificios tienen este tipo de regulación.

En el visor Power Bi creado, se pueden consultar gráficas como ésta, para cada edificio e intervalo temporal.

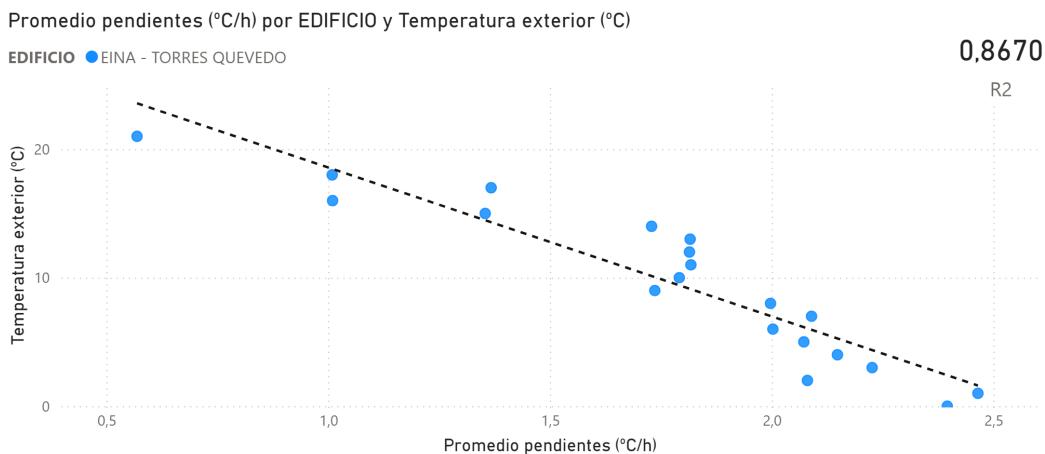


Figura 10. Ejemplo de fuerte correlación temperatura exterior - pendientes. Edificio Torres Quevedo.

- **Temperatura interior** en el momento del arranque. Debido a la inercia térmica, el comportamiento de los edificios es distinto cuando están fríos (por ejemplo a principios de semana cuando los muros están a menor temperatura), que cuando se han calentado (a final de semana). A diferencia de la correlación con la temperatura exterior, en un mayor número de edificios se observa correlación con la temperatura interior. En Zaragoza, 7 edificios presentan fuerte correlación ($>0,8$) entre las pendientes y la temperatura exterior al comienzo de la franja de estudio, 7 correlación media en el intervalo ($0,6-0,8$], 6 correlación débil ($0,4-0,6$] y 9 no presentan correlación. Un ejemplo de edificio con alta correlación con la temperatura interior (figura 11) es la Facultad de Medicina B, que sin embargo no presentaba correlación con la temperatura exterior.

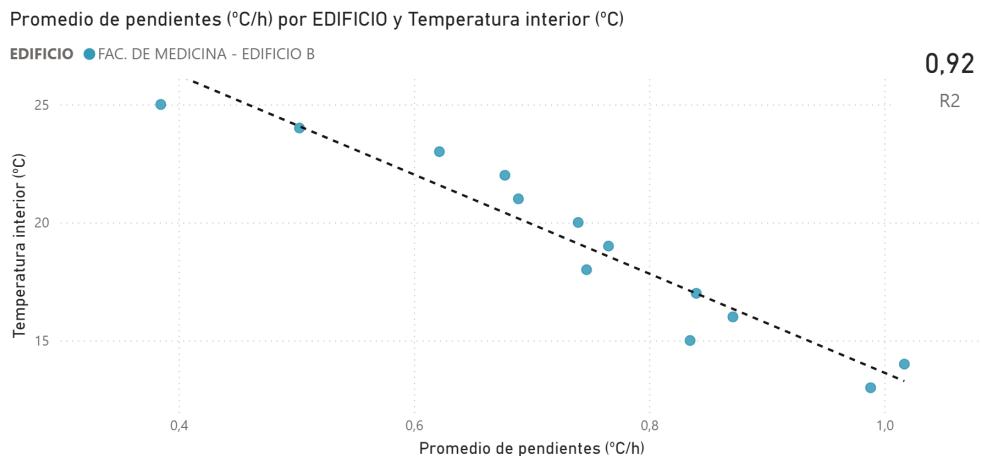


Figura 11. Ejemplo de edificio con fuerte correlación con la temperatura interior - pendientes. Facultad de Medicina B.

- **El día de la semana.** Se ha realizado también correlación entre las pendientes y el día de la semana. En principio, este parámetro debería quedar englobado en el de la temperatura interior, si bien, se ha observado que hay edificios en los que no hay correlación entre las pendientes y la temperatura interior, pero sí que existe entre las pendientes y el día de la semana. También hay que destacar que, en los casos en los que hay correlación, la variación de la pendiente en función del día de la semana, es menos significativa que para la temperatura interior y exterior, quizás porque éstas tienen una mayor influencia al considerar un periodo de tiempo amplio. En Zaragoza, 8 edificios presentan fuerte correlación ($>0,8$) entre las pendientes y el día de la semana al comienzo de la franja de estudio, 3 correlación media en el intervalo ($0,6-0,8$], 3 correlación baja en el intervalo ($0,4-0,6$] y 15 no presentan correlación.

Un ejemplo de edificio que presentan una alta correlación entre el día de la semana y la pendiente y en el que no había correlación con la temperatura interior es el de la UTCE, como se observa en la figura 12, aunque la variación es poco significativa, de sólo $0,3 ^{\circ}\text{C}/\text{h}$. Por otra parte, en la figura 13, se muestra la evolución de las pendientes a lo largo de una semana tipo en este edificio, viendo cómo el valor va disminuyendo a lo largo de la semana desde $1,73 ^{\circ}\text{C}/\text{h}$ el lunes hasta $1,42 ^{\circ}\text{C}/\text{h}$ el viernes.

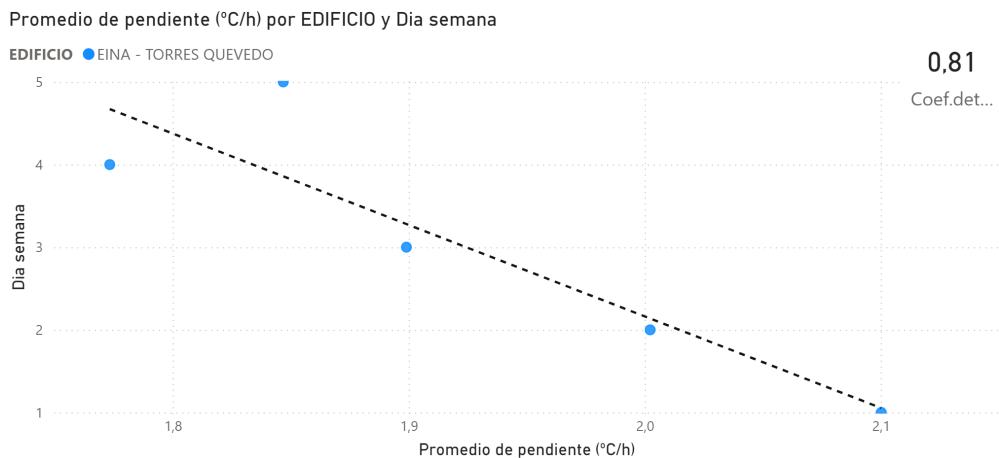


Figura 12. Ejemplo de correlación fuerte día de la semana-pendientes. Edificio UTCE.



Figura 13. Evolución de las pendientes en una semana.

- Estado de la instalación:** Debido al envejecimiento de la instalación o a labores de mantenimiento, puede cambiar el comportamiento de la instalación afectando entre otros aspectos a la potencia disponible. Por ejemplo, la avería en los compresores del edificio Betancourt, disminuyó la potencia disponible durante cierto periodo de tiempo hasta que los compresores fueron sustituidos o reparados, lo que pudo afectar a las pendientes. Ejemplos como este ponen de manifiesto la importancia de basarse principalmente en los datos recientes.

Para comprobar el efecto de la reparación de los compresores del edificio Betancourt, se han comparado los valores promedio de las pendientes en el 2023 frente a 2024, observando que ha aumentado de 0,76 a 0,89 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$, como se puede ver en la figura 14. Sin embargo en el resto de los edificios del Campus Río Ebro el valor ha permanecido aproximadamente constante.

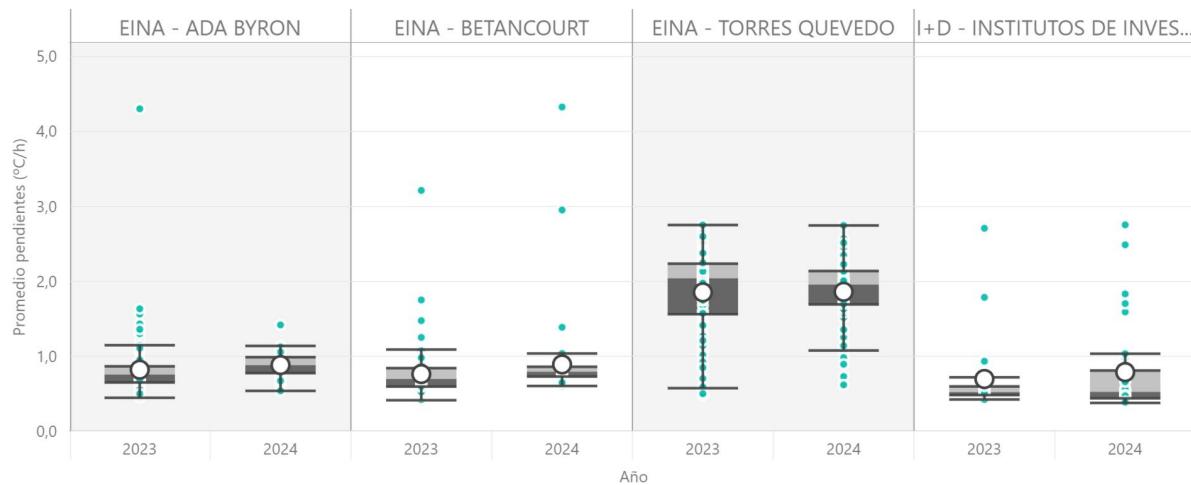


Figura 14. Ejemplo de gráfico de cajas y bigotes del promedio de pendientes por fecha y edificio del Campus Río Ebro con comparativa por años.

Algunas de las **causas de la variación de las pendientes entre edificios son las siguientes:**

- **Uso de la instalación:** Ejemplos como la residencia de profesores, que tienen ocupación permanentemente, mantendrán una temperatura más constante a lo largo del día, lo que puede hacer que las pendientes sean inferiores.
- **Tipología de sistemas de climatización:** En general, los edificios que cuentan con sistemas de climatización por aire suelen ser más rápidos que los de agua (radiadores).
- **Ratio de potencia instalada disponible y demanda térmica:** Uno de los factores que puede influir en los valores de las pendientes entre edificios es el balance entre demanda térmica y potencia disponible.

A modo de ejemplo, el edificio Torres Quevedo presenta altas velocidades de calentamiento. Esto puede deberse no sólo a la tipología del sistema de climatización, sino también a que el ratio de la potencia de las calderas de gas del Torres Quevedo por unidad de superficie sea mayor que el ratio en los otros edificios del campus, que tienen bombas de calor. Además, la demanda por unidad de superficie en el Torres Quevedo podría ser inferior debido a menores tasas de ventilación o menor inercia térmica, entre otros factores.

Para verificar dicha hipótesis se ha analizado la potencia de los equipos de climatización por metro cuadrado, de los distintos edificios (ver página del visor Power Bi “correlación potencia – pendiente”). En el caso del Campus Río Ebro, se observa claramente cómo la potencia instalada por metro cuadrado en el Torres Quevedo es aproximadamente el triple a la del Betancourt, lo que podría ser la causa de que las pendientes de la temperatura interior en el periodo de puesta en marcha sean mayores.

Por otra parte, para disminuir la demanda térmica en el arranque vinculada al tratamiento del aire de ventilación y así aumentar las pendientes de ascenso de la temperatura interior, en el informe 20 se propone retrasar el encendido de la ventilación mecánica hasta que haya ocupación en el edificio.

Promedio de pendiente ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$) por EDIFICIO y Potencia calefacción por m^2 (kW/m^2)
EDIFICIO ● EINA - ADA BYRON ● EINA - BETANCOURT ● EINA - TORRES QUEVEDO ● I+D - INSTITUTOS DE INVESTIGACIÓN

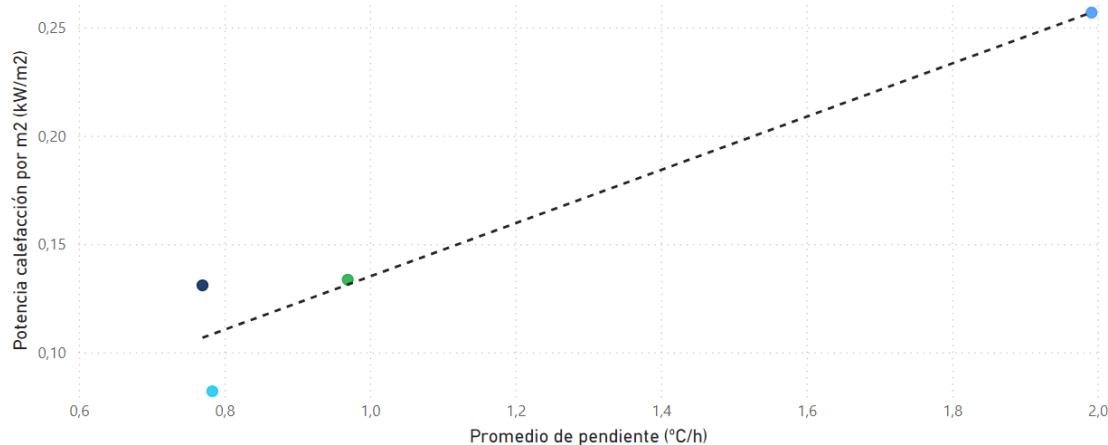


Figura 15. Correlación potencia instalada HVAC por metro cuadrado frente a promedio de pendientes.

Algunas de las **causas de la variación de las pendientes entre los espacios de un mismo edificio son las siguientes:**

- En caso de **edificios con diferentes sistemas de climatización por espacios** (sistemas de climatización por aire o por agua según la estancia), el comportamiento sería distinto. Este es el caso del edificio Torres Quevedo, de ahí la amplitud de la caja y de los bigotes en la figura 14.
- **Orientación** del espacio: Los espacios ubicados en la cara sur del edificio se calentarán más rápido que los de ubicación norte.
- **Planta**: Las plantas superiores suelen tener una mayor irradiación solar, si bien, en las horas de estudio (antes de las 9:00 h), es un valor poco relevante en los meses de invierno.
- **Principio o final del ramal** del sistema de **climatización**. La temperatura de impulsión será mayor en los espacios de principio de línea, por lo que se calentarán antes.
- **Apertura de la válvula de tres vías** del fancoil (en caso de climatización con fancoils por aire). Lo habitual es que en el momento de encendido de la climatización, la válvula de tres vías esté en su máxima apertura. Si bien, puede ocurrir que por fallo o por el ajuste del termostato se encuentre en otra posición menor, por lo que el calentamiento del espacio sería a menor velocidad.
- **Nivel de potencia del ventilador** del fancoil (en caso de climatización por aire). Si el usuario selecciona en la unidad de control del fancoil la posición de máxima potencia (velocidad) del ventilador, la estancia se calentará con mayor rapidez.
- **Eventos aleatorios**: Por ejemplo, una ventana abierta o una ventilación excesiva por parte del personal de limpieza a primera hora de la mañana, desvirtúan estos valores.

Este estudio pone de manifiesto que hay claras diferencias entre los distintos edificios en el comportamiento de las pendientes de calentamiento del aire interior, en el periodo de arranque de la calefacción.

La figura 16, obtenida de la pantalla del visor “Resumen pendientes”, muestra el valor promedio de las pendientes calculadas (en los meses de enero a marzo y de octubre a diciembre de 2023 y de enero a marzo de 2024), ordenando los **edificios de mayor a menor velocidad de calentamiento**, de acuerdo con las **categorías** presentadas en la tabla 4. Esta tabla es una de las principales aportaciones de este TFM, ya que esta información no se conocía hasta ahora. En la figura 16, se muestra también el **número total de pendientes calculadas**, que puede ser un buen indicativo de la **fiabilidad** del valor de las pendientes promedio. Edificios en los que se han instalado sensores recientemente, como en el campus de Teruel, presentan valores de pendientes todavía provisionales, a falta de un mayor tiempo de estudio.

A (2-2.5] °C/h	Edificios muy rápidos
B (1.5-2] °C/h	Edificios rápidos
C (1-1.5] °C/h	Edificios medianamente rápidos
D (0.8-1] °C/h	Edificios medianamente lentos
E (0.6-0.8] °C/h	Edificios lentos
F (0.4-0.6] °C/h	Edificios muy lentos

Tabla 4. Categorías para la clasificación de los edificios, según la velocidad de calentamiento promedio en °C/h.

Pendientes agrupadas	CAMPUS	EDIFICIO	Promedio pendientes	Recuento
A (2-2.5] °C/h	Campus San Francisco	SERVICIOS CENTRALES	2,18	402
B (1.5-2] °C/h	Campus Rio Ebro	EINA - TORRES QUEVEDO	1,97	989
B (1.5-2] °C/h	Campus Miguel Servet	FAC. VET. - PLANTA PILOTO - CTA	1,57	108
B (1.5-2] °C/h	Campus San Francisco	EDIFICIO CONSTRUCCIONES Y MANTENIMIENTO - UTCM	1,56	208
C (1-1.5] °C/h	Campus de Huesca	FAC. DE EMPRESA Y GESTIÓN PÚBLICA - RD. NIÑOS	1,40	161
C (1-1.5] °C/h	Campus San Francisco	EDIFICIO SAI - SERV. APOYO A LA INVESTIGACIÓN	1,30	163
C (1-1.5] °C/h	Campus Miguel Servet	SAI - NAVE N 5 - OFICINAS SAEA	1,24	732
C (1-1.5] °C/h	Campus de Huesca	VICERRECTORADO DE HUESCA	1,22	211
C (1-1.5] °C/h	Campus de Teruel	VICERRECTORADO TERUEL	1,18	34
C (1-1.5] °C/h	Campus de Huesca	E.P.S. - LABORATORIOS - ED. LORETO	1,17	92
C (1-1.5] °C/h	Campus San Francisco	FAC. DE EDUCACIÓN NUEVA	1,04	332
C (1-1.5] °C/h	Campus San Francisco	EDIFICIO DE SERVICIOS	1,02	58
C (1-1.5] °C/h	Campus San Francisco	FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES Y DEL TRABAJO	1,01	384
D (0.8-1] °C/h	Campus San Francisco	FAC. DE CIENCIAS DE LA SALUD	0,96	901
D (0.8-1] °C/h	Campus de Huesca	FAC. CC. SALUD Y DEPORTE - ED. ODONTOLOGÍA	0,95	130
D (0.8-1] °C/h	Campus San Francisco	FAC. DE DERECHO - EDIFICIO DERECHO I	0,95	394
D (0.8-1] °C/h	Campus San Francisco	FAC. DE MEDICINA - EDIFICIO A	0,94	114
D (0.8-1] °C/h	Campus de Huesca	E.P.S. - AULAS - ED. GRATAL	0,94	43
D (0.8-1] °C/h	Campus San Francisco	FAC. DE DERECHO - EDIFICIO DERECHO III	0,93	62
D (0.8-1] °C/h	Campus de Huesca	E.P.S. - POLITÉCNICA - ED. TOZAL DE GUARA	0,91	186
D (0.8-1] °C/h	Campus San Francisco	INTERFACULTADES I	0,88	1171
D (0.8-1] °C/h	Campus Rio Ebro	EINA - ADA BYRON	0,86	876
D (0.8-1] °C/h	Campus Miguel Servet	FAC. VETERINARIA - AULARIO	0,84	574
D (0.8-1] °C/h	Campus San Francisco	FAC. FILOSOFÍA Y LETRAS - BIBLIOTECA HUMANIDADES	0,83	50
D (0.8-1] °C/h	Campus de Huesca	FAC. CIENCIAS HUMANAS Y EDUCACION - ED. PRINCIPAL	0,82	136
D (0.8-1] °C/h	Campus de Teruel	FAC. CIENCIAS SOCIALES Y HUMANAS	0,82	105
D (0.8-1] °C/h	Campus San Francisco	FAC. DE DERECHO - EDIFICIO DERECHO II	0,80	112
E (0.6-0.8] °C/h	Campus Rio Ebro	EINA - BETANCOURT	0,79	1381
E (0.6-0.8] °C/h	Campus San Francisco	EDIFICIO CERVANTES - FAC. DE FILOSOFÍA Y LETRAS	0,78	23
E (0.6-0.8] °C/h	Campus de Huesca	FAC. CC. SALUD Y DEPORTE - POLIDEP. RIO ISUELA	0,78	309
E (0.6-0.8] °C/h	Campus Miguel Servet	FAC. VETERINARIA - EDIFICIO CENTRAL	0,77	369
E (0.6-0.8] °C/h	Campus San Francisco	FAC. DE MEDICINA - EDIFICIO B	0,74	190
E (0.6-0.8] °C/h	Campus de Huesca	E.P.S. - CHALETS - ED. SALTO DEL ROLDÁN	0,73	130
E (0.6-0.8] °C/h	Campus Rio Ebro	I+D - INSTITUTOS DE INVESTIGACIÓN	0,73	82
E (0.6-0.8] °C/h	Campus San Francisco	FAC. DE CIENCIAS - EDIFICIO B - MATEMÁTICAS	0,71	497
E (0.6-0.8] °C/h	Campus San Francisco	FAC. DE CIENCIAS - EDIFICIO A - FÍSICAS	0,68	611
E (0.6-0.8] °C/h	Campus de Huesca	FAC. CIENCIAS HUMANAS Y EDUCACION - ANEXO	0,67	66
E (0.6-0.8] °C/h	Campus Miguel Servet	FAC. VETERINARIA - EDIFICIO ZOOTECNIA	0,60	550
F (0.4-0.6] °C/h	Campus San Francisco	FAC. DE CIENCIAS - EDIFICIO C - GEOLÓGICAS	0,58	322
F (0.4-0.6] °C/h	Campus San Francisco	C.M.U. CERBUNA	0,57	76
F (0.4-0.6] °C/h	Campus de Teruel	BELLAS ARTES	0,56	71
F (0.4-0.6] °C/h	Campus San Francisco	RESIDENCIA DE PROFESORES	0,55	181
F (0.4-0.6] °C/h	Campus de Huesca	FAC. CC. SALUD Y DEPORTE Y C.M.U. RAMÓN ACÍN	0,54	188
F (0.4-0.6] °C/h	Campus de Teruel	ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA DE TERUEL	0,43	13

Figura 16. Valores promedio de pendientes por edificio y mes, en 2023-24 y número de pendientes totales calculadas.

El edificio con mayor velocidad de calentamiento (**2 a 2,5 °C/h**) es el de Servicios Centrales (San Francisco). También los edificios Torres Quevedo (Río Ebro), CTA (Miguel Servet) y UTM (San Francisco) en la franja de 1,5 a 2 °C/h. Seguidamente (**1 a 1,5 °C/h**) la Facultad de Empresa (Huesca), los edificios SAI (Miguel Servet) y SAI (San Francisco), los edificios del Vicerrectorado (Huesca y Teruel), así como los laboratorios del edificio Loreto (Huesca), la nueva Facultad de Educación (San Francisco) y el edificio de Servicios (San Francisco).

La mayoría de los edificios se sitúan entre **0,8 y 1 °C/h**, como se puede ver en la figura 16.

Los edificios con menores pendientes (**0,4 a 0,6 °C/h**) son la Residencia de Profesores, la Facultad de Ciencias de la Salud y del Deporte y CMU Ramón Acín (Huesca), el Colegio Mayor Cerbuna (San Francisco) y la facultad de Geológicas (San Francisco). Es reseñable que en esta categoría, la mayoría de los edificios son colegios mayores o residencias, por lo que un uso diferente del edificio puede afectar a las pendientes.

Dada la variabilidad en las velocidades de calentamiento de los edificios, **es razonable agrupar los que se comporten de forma similar, de cara a plantear unos horarios de climatización distintos para cada tipología**. La diferencia en el comportamiento de cada edificio se debería tener en cuenta cuando las variaciones en los horarios de encendido sean significativas, por ejemplo para una diferencia mayor a 15-30 minutos (criterio consultado con la Oficina Verde).

Además, para algunos edificios se ha verificado que existe correlación entre la pendiente y la temperatura exterior, temperatura interior o el día de la semana. A modo de resumen, se ha creado una tabla en el visor Power Bi, “Coef. Determinación”, con los coeficientes de regresión lineal o de determinación R^2 de las gráficas de correlación de temperatura exterior-pendientes, día de la semana-pendientes y temperatura interior-pendientes. La tabla recoge los campus de Zaragoza (todavía no se disponen de los datos meteorológicos de Huesca y Teruel), marcando en color más oscuro aquellos espacios con una correlación mayor. En la figura 17 se muestra un ejemplo de esta tabla, para los registros del año 2023 y 2024. Hay edificios como Interfacultades I, en el que hay correlación con las tres variables, y otros en los que sólo hay correlación con una o dos de las variables.

CAMPUS	Coef.determinación T.ext	Coef.determinación T.int	Coef.determinación Día.sem
▀ Campus Miguel Servet			
FAC. VET. - PLANTA PILOTO - CTA	0,2035	0,89	0,81
FAC. VETERINARIA - AULARIO	0,5160	0,60	0,71
FAC. VETERINARIA - EDIFICIO CENTRAL	0,7656	0,98	0,05
FAC. VETERINARIA - EDIFICIO ZOOTECNIA	0,4648	0,84	0,23
SAI - NAVE N 5 - OFICINAS SAEA	0,7022	0,63	0,82
▀ Campus Rio Ebro			
EINA - ADA BYRON	0,5917	0,35	0,21
EINA - BETANCOURT	0,5821	0,46	0,15
EINA - TORRES QUEVEDO	0,8670	0,42	0,81
I+D - INSTITUTOS DE INVESTIGACIÓN	0,0850	0,63	0,17
▀ Campus San Francisco			
C.M.U. CERBUNA	0,1790	0,00	0,22
EDIFICIO CERVANTES - FAC. DE FILOSOFÍA Y LETRAS	0,4137	0,76	0,17
EDIFICIO CONSTRUCCIONES Y MANTENIMIENTO - UTCM	0,1900	0,02	0,96
EDIFICIO DE SERVICIOS	0,4964	0,75	0,89
EDIFICIO SAI - SERV. APOYO A LA INVESTIGACIÓN	0,0304	0,12	0,28
FAC. DE CIENCIAS - EDIFICIO A - FISICAS	0,2024	0,62	0,76
FAC. DE CIENCIAS - EDIFICIO B - MATEMÁTICAS	0,0245	0,71	0,38
FAC. DE CIENCIAS - EDIFICIO C - GEOLÓGICAS	0,2087	0,03	0,81
FAC. DE CIENCIAS DE LA SALUD	0,1411	0,28	0,90
FAC. DE DERECHO - EDIFICIO DERECHO I	0,2975	0,01	0,75
FAC. DE DERECHO - EDIFICIO DERECHO II	0,1236	0,56	0,56
FAC. DE DERECHO - EDIFICIO DERECHO III	0,1282	0,18	0,14
FAC. DE EDUCACIÓN NUEVA	0,2179	0,72	0,14
FAC. DE MEDICINA - EDIFICIO A	0,5146	0,05	0,26
FAC. DE MEDICINA - EDIFICIO B	0,0204	0,92	0,52
FAC. FILOSOFÍA Y LETRAS - BIBLIOTECA HUMANIDADES	0,5555	0,87	0,06
FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES Y DEL TRABAJO	0,4852	0,54	0,51
INTERFACULTADES I	0,7395	0,96	0,82
RESIDENCIA DE PROFESORES	0,1162	0,41	0,01
SERVICIOS CENTRALES	0,9357	0,94	0,09

Figura 17. Coeficientes de determinación por edificios y tipo de gráfica.

A partir de este estudio en base a los cálculos de pendientes, **se plantea una nueva metodología para establecer la hora de arranque de los sistemas de climatización de forma dinámica y en tiempo real**. Dada una temperatura interior objetivo de 19°C (BOE 8563 Orden PCM/466/2022) y el valor de pendiente, el sistema podría calcular el momento adecuado para arrancar los sistemas de climatización en función de la temperatura interior promedio del edificio.

Como primera aproximación, se podría tomar el valor promedio de pendientes recogidos en la figura 16. Si dentro de un mismo edificio hay espacios con pendientes más bajas que el promedio, quizás se debería tomar el valor de los espacios más desfavorables, mientras se llevan a cabo las mejoras de mantenimiento pertinentes.

Dado que se ha observado que hay edificios en los que existe correlación con la temperatura interior y exterior en el arranque y con el día de la semana, sería más fiable no utilizar únicamente el valor promedio, sino una **correlación matemática multivariable** (como podrían ser las redes neuronales) que establezca el valor de las pendientes según las condiciones de estudio.

Hay que tener en cuenta que, mientras no esté completamente automatizado el proceso y los horarios se tengan que introducir manualmente, sólo sería relevante considerar los factores que impliquen una variación significativa del valor de las pendientes, como ya se ha comentado anteriormente. Es decir, cuando la hora de arranque de los sistemas de climatización varíe en más de 15 ó 30 minutos.

Además del valor de las pendientes, hay otro aspecto importante a considerar de cara a establecer el horario de arranque, que es el **desfase entre el aumento de la temperatura de impulsión en el arranque y de la temperatura interior**. En la figura 18 se muestra un ejemplo en el que el desfase es de media hora, mientras que en la figura 19 el desfase es de apenas 10 minutos. Como línea de futuro, habrá que calcular de forma automatizada dicho desfase, para obtener un valor promedio de desfase por edificio, aunque se han analizado algunos casos y **ronda entre los 10 y 30 minutos**.

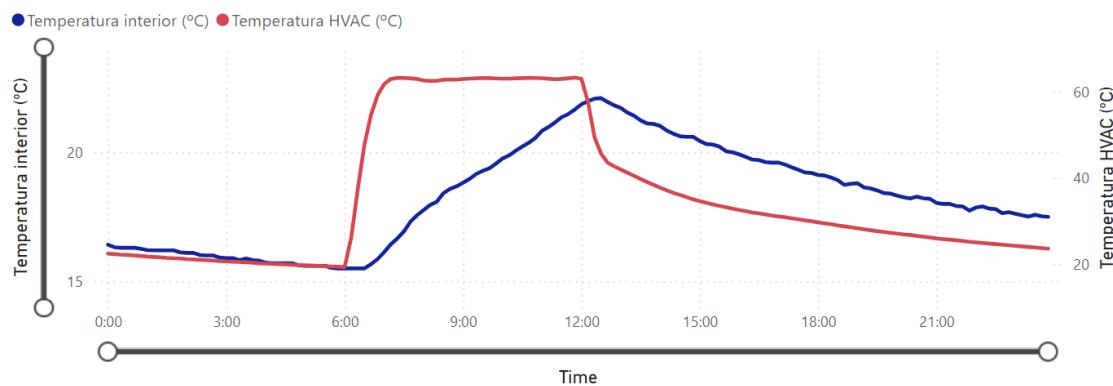


Figura 18. Ejemplo de desfase de 30' entre el arranque y el aumento de la temperatura interior. Edificio UTCE.

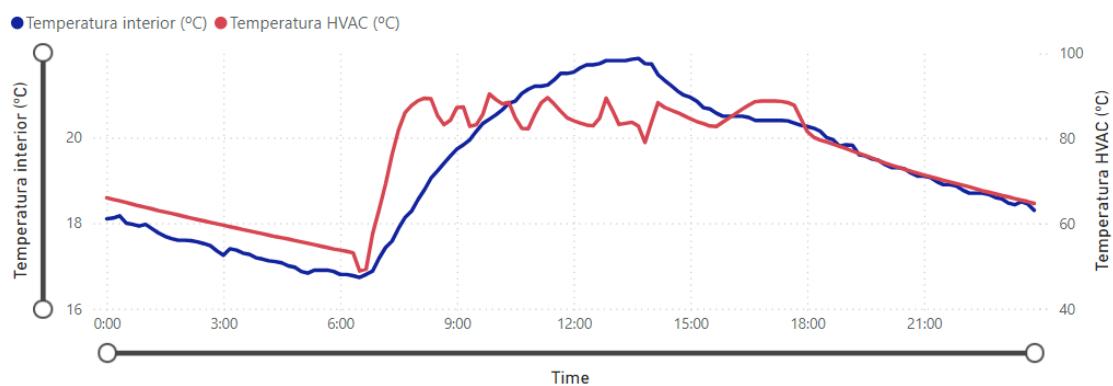


Figura 19. Ejemplo de desfase de 10' entre el arranque y el aumento de la temperatura interior. Edificio CTA.

El esquema del algoritmo para establecer el horario de encendido sería el siguiente:



Figura 20. Esquema del planteamiento de algoritmo para la planificación del horario de arranque.

El motivo por el que se ha propuesto un modelo experimental frente a un modelo físico es debido a la complejidad de la realidad a modelizar y al gran número de variables que influyen. Algunas de las fuentes de incertidumbre en las simulaciones son las siguientes:

Edificio: El comportamiento tridimensional del edificio y la incertidumbre de la determinación de las dimensiones de los edificios, que influyen en las cargas térmicas y los flujos de calor en el edificio:

- Cargas externas
 - o Transmitancia térmica de los cerramientos, y la incertidumbre asociada con las propiedades termofísicas de los materiales (variación con la temperatura, faltas de homogeneidad, errores en el proceso de medida)
 - o Infiltraciones
- Cargas internas
 - o Variabilidad en las cargas asociadas con equipamiento informático, iluminación, etc.

Instalaciones: Influyen las temperaturas de consigna (producción y distribución); la variabilidad en el caudal de ventilación, según pérdida de carga; y la eficiencia de los equipos en función de diferentes parámetros de influencia como el trabajo a carga parcial de los equipos, su deterioro o las condiciones exteriores.

Meteorología: Hay una alta variabilidad asociada a los datos climatológicos en función de la base de datos elegida y el periodo elegido (cambio climático).

Teniendo en cuenta el considerable número de edificios pertenecientes a la Universidad de Zaragoza y la multitud de fuentes de incertidumbre involucradas, es probable que el trabajo requerido para llevar a cabo este modelado físico no se vea compensado por la incertidumbre inherente a los resultados obtenidos. Por otra parte, numerosos estudios [49] [50], han demostrado que existe una gran diferencia entre las simulaciones y la realidad, lo que se denomina ***Building energy performance gap***. Estas diferencias son debidas a las numerosas hipótesis simplificadoras necesarias para modelar o simular sistemas complejos. Por todo ello, se considera más razonable avanzar hacia modelos híbridos o experimentales.

2. Análisis de datos de calidad de aire interior

En este capítulo se lleva a cabo un análisis de la calidad de aire interior en 10 espacios diferentes del nuevo edificio de Filosofía y Letras. Para ello, se han utilizado equipos MICA de la compañía *inBiot Monitoring*, 5 de ellos MICA plus y 5 MICA estándar. También se ha verificado el funcionamiento de los sensores, mediante una comparativa de las mediciones de 8 de estos sensores en una misma ubicación durante 43 días. En la figura 21 se muestra el proceso junto con las fechas para cada fase. El análisis de los datos se realizará mediante el desarrollo de un visor Power Bi disponible en el siguiente [enlace](#). Este visor permite a cualquier usuario y de forma muy sencilla seleccionar el periodo de tiempo a estudiar y visualizar distintos tipos de gráficas, como las que se expondrán a lo largo de este capítulo.



Figura 21. Proceso del estudio.

Las variables monitorizadas y los números identificadores de cada equipo se muestran en la tabla 5. En el informe 23, se encuentra el estudio detallado y, a continuación, se detallarán los aspectos más relevantes.

MICA	MICA Plus
Temperatura	Temperatura
Humedad relativa	Humedad relativa
CO ₂	CO ₂
TVOC	TVOC
PM _{2.5} , PM ₁₀	PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₄ , PM ₁₀ Formaldehído
Equipos Nº.: 1, 2, 6, 8, 10	Equipos Nº.: 3, 4, 5, 7, 9

Tabla 5. Comparativa sensor MICA y MICA Plus.

Durante la **fase de validación**, se han observado algunas diferencias poco significativas en las medidas de formaldehído (dentro del rango de precisión), así como en temperatura y humedad (ligeramente fuera del rango de precisión).

Tras haber llevado a cabo la comparativa de las mediciones en una ubicación fija, a partir del 26 de marzo de 2024, se instalaron los sensores en distintos espacios de la Facultad de Filosofía y Letras (ver tabla 6).

Nº sensor	Pabellón	Espacio	Uso
1	Pabellón A	Sala juntas A 1. 07	Sala juntas
2	Pabellón A	Planta 2	Secretaría
3	Pabellón E	E 2. 04	Despacho
4	Pabellón A	Aula A 3. 2	Aula
5	Pabellón B	B 2. S02	Despacho
6	Pabellón B	Seminario B 3. 2	Seminario
7	Pabellón A	Aula A 2. 2	Aula
8	Pabellón A	Aula A 4. 2	Aula
9	Pabellón B	B 2. N14	Despacho
10	Pabellón B	B 1. P05	Secretaría

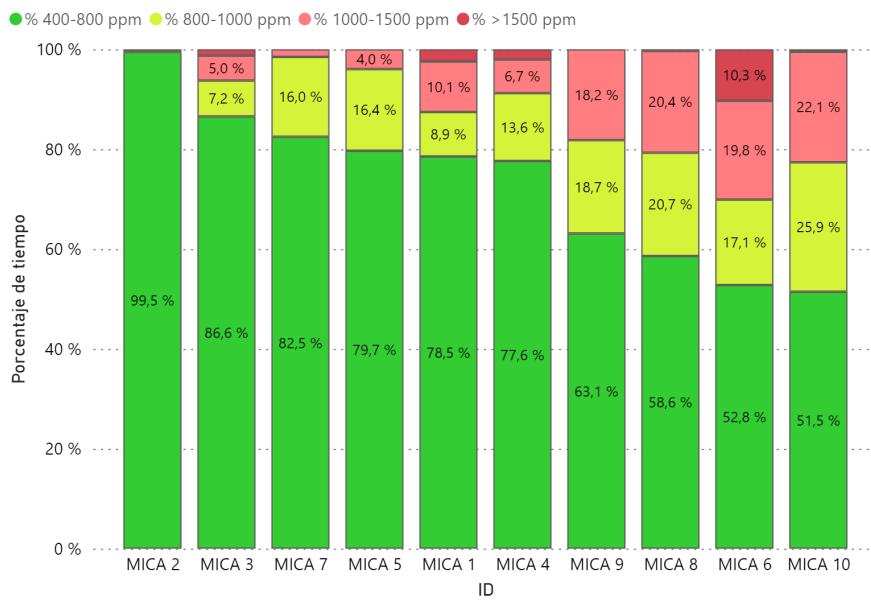
Tabla 6. Ubicación de los sensores y tipo de uso.

A continuación se lleva a cabo el análisis de las mediciones en la Facultad de Filosofía y Letras, entre el 25 de marzo y el 13 de mayo de 2024. La metodología seguida para el análisis consiste en el cálculo, en horario de 8 a 20 h y de lunes a viernes, del porcentaje de tiempo en el que los valores de cada parámetro se encuentran en distintas franjas. Para calcular los porcentajes respecto al periodo con ocupación y, dado que no se dispone de información de ocupación por espacio, se han seleccionado los valores de CO₂ superiores a 500 ppm (sin ocupación los valores son cercanos a 400 ppm). Las franjas que se han considerado para el análisis de los registros de los distintos contaminantes se muestran en la tabla 7.

Contaminante	CO ₂ (ppm)	TVOC (índice relativo 0-500)	Formaldehído (μg/m ³)
Niveles óptimos	400-800	< 100	< 70
Niveles aceptables	800-1000	100-200	70-120
Niveles altos	1000-1500	200-400	>120
Niveles muy elevados	>1500	> 400	

Tabla 7. Franjas consideradas para el análisis de los contaminantes.

Respecto al CO₂, los porcentajes de tiempo por encima de 1000 ppm de CO₂ en el periodo estudiado son de hasta un 30 %, como se observa en la figura 22. Cabe destacar como peores resultados los obtenidos en los MICA 6, 8, 9 y 10. En estos espacios sería deseable estudiar posibles **mejoras en la ventilación**, especialmente en el seminario B 3.2 (MICA 6), por tener un porcentaje de tiempo por encima de 1500 ppm del 10%, y la secretaría del bloque B, debido a su alta ocupación y uso continuado está un mayor porcentaje de tiempo por encima de 800 ppm.

Figura 22. Porcentaje de tiempo (por equipo) en horario de ocupación con el CO₂ en distintas franjas.

Respecto a los TVOC, los porcentajes por encima del índice 400 index son elevados para el MICA 6 (seminario) y MICA 9 (despacho), con hasta un 20% del tiempo en esta franja (ver figura 23). En la franja de 200-400, los porcentajes oscilan entre 6 y 45%, destacando el MICA 3 (despacho) y MICA 2 (secretaría). Se ha observado, en algunos casos, correlación entre los TVOC y el CO₂ (ver figura 24), así como entre los TVOC y la temperatura (ver figura 25). También se ha observado que se producen diariamente en días laborables, picos de TVOC primera hora de la mañana (7:00 h) en la secretaría del bloque A (MICA 2). Sería conveniente revisar la causa de dichos picos y, en caso de que sean debido a **ambientadores**, informar al servicio de limpieza de que prescinda de ellos. Si se identifica que es debido a productos de limpieza que contienen fragancias, se podría establecer en los pliegos de este servicio el uso de productos ECO, libres de elementos tóxicos.

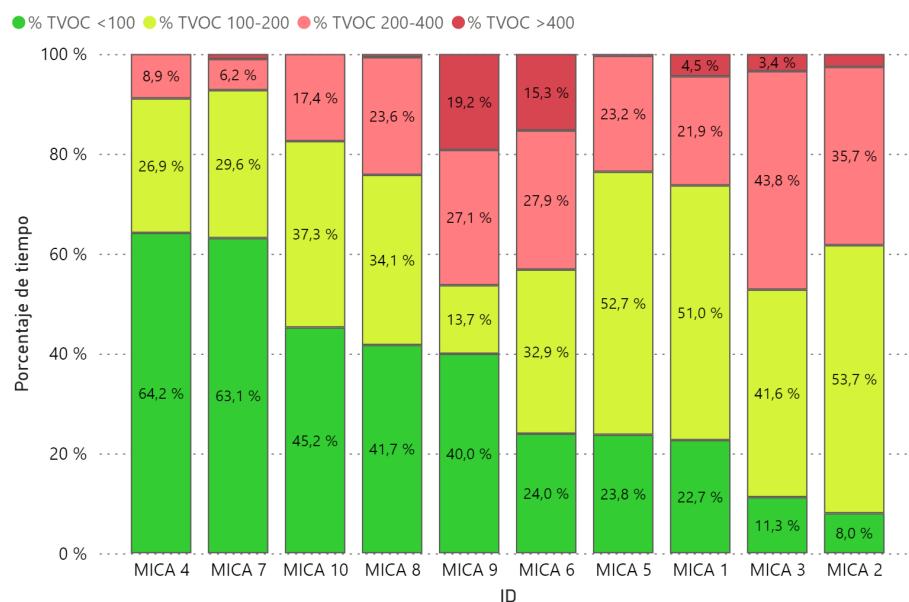


Figura 23. Porcentaje de tiempo (por equipo) en horario de ocupación con el TVOC en distintas franjas.

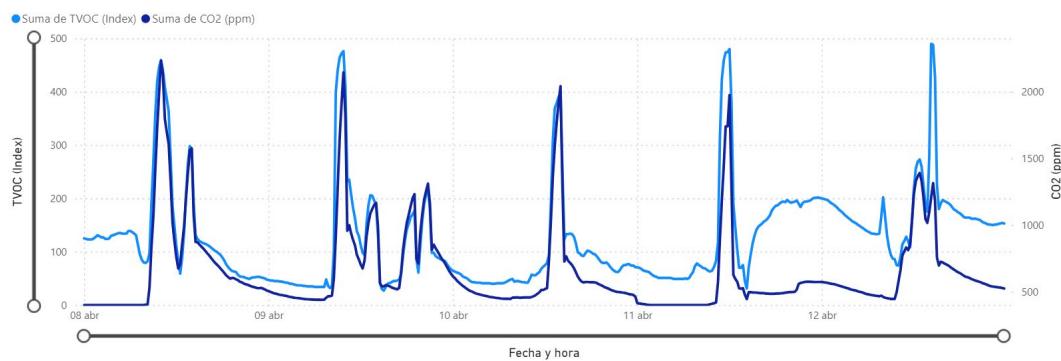


Figura 24. Representación conjunta de TVOC y CO2. Ejemplo de alta correlación.

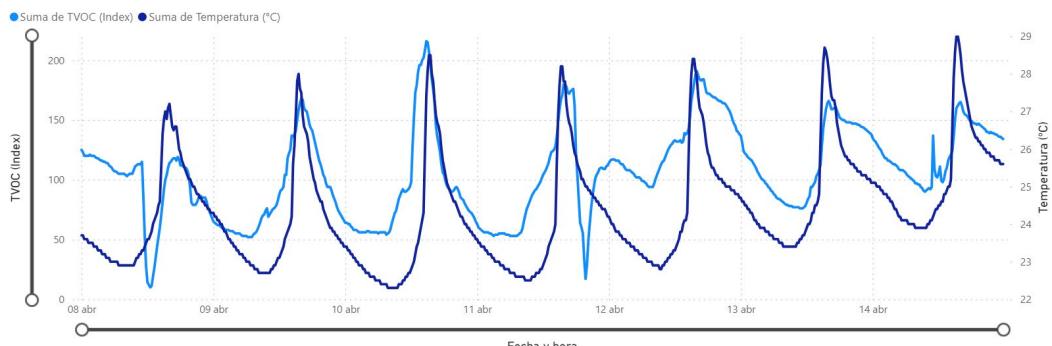


Figura 25. Representación conjunta de TVOC y Temperatura. Ejemplo de alta correlación.

Los despachos presentan valores bajos de **formaldehído** (ver figura 26), sin embargo, en aulas como la A 3.2 (MICA 4) hay valores elevados, con un 30% del tiempo en la franja $70\text{-}120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y casi un 5% en la franja $> 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se ha observado que, gracias a la ventilación mecánica, los niveles disminuyen cuando hay ocupación. A pesar de ello, en algunas ocasiones la ventilación es insuficiente.

En caso de que la modulación de los sistemas de ventilación se realice en función de la presencia o del nivel de CO₂ únicamente, se podrían conectar estos sensores MICA al control de los sistemas HVAC, para que aumente el caudal en caso de detectar altos niveles de formaldehído. Al igual que para los TVOC, en el caso del formaldehído también se ha observado un aumento de los valores con la temperatura. Este hecho lleva a pensar que en **verano** sería adecuado **aumentar los caudales de ventilación** respecto de los caudales de invierno, una afirmación que no es habitual encontrar en la bibliografía.

Los TVOC en general parecen estar más ligados a la ocupación (perfumes, desodorantes, efluentes biológicos, ropa, etc.), mientras que el formaldehído parece estar más ligado al mobiliario o materiales de construcción. Esta hipótesis se deduce del hecho de que cuando hay ventilación el formaldehído baja, mientras que los TVOC aumentan, quizás porque la ventilación no es suficiente para contrarrestar la alta tasa de emisión de TVOC.

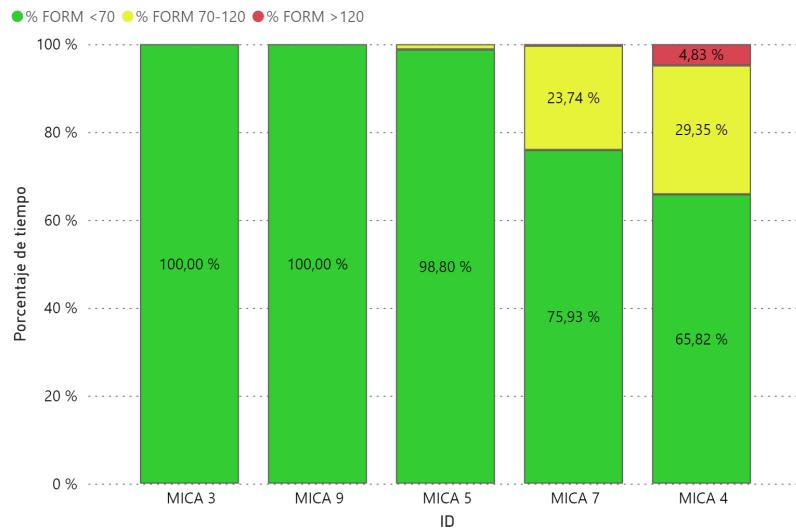


Figura 26. Porcentaje de tiempo (por equipo) en horario de ocupación con el formaldehído en distintas franjas.

Las **partículas** no presentan valores elevados, salvo en alguna ocasión puntual y la **humedad** está generalmente en el umbral deseado, estando en algunos casos por debajo del umbral inferior recomendado de 35%.

Los datos recopilados han facilitado un **primer análisis sobre los niveles de los principales contaminantes** en el interior de este edificio. En base a los datos analizados parece razonable proponer **mejoras en ventilación** en algunos de los espacios.

En general, sería deseable mantener una **ventilación mínima** que ayudase a combatir las fuentes de contaminación constante relacionadas con materiales de construcción y mobiliario (TVOC y formaldehído). Este caudal mínimo se debería de incrementar para combatir fuentes variables de contaminación en concreto:

- Ligadas a ocupantes (detectable por nivel de CO₂)
- Aumento de TVOC y formaldehido con la temperatura

A modo de **resumen**, la tabla 8 recoge los espacios en los que se ha detectado un nivel alto de alguno de los contaminantes y sería necesario aumentar la ventilación.

Nº sensor	Uso	% tiempo CO ₂ alto	% tiempo TVOC alto	% tiempo formaldehído alto	Resumen
1	Sala juntas				OK
2	Secretaría		200-400 index		Recomendable mayor ventilación y evitar fuentes de contaminación (ej. ambientadores)
3	Despacho		200-400 index		Recomendable mayor ventilación
4	Aula			> 120 µg/m ³	Necesaria mayor ventilación
5	Despacho				OK
6	Seminario	> 1500 ppm	>400 index		Necesaria mayor ventilación
7	Aula			70-120 µg/m ³	Recomendable mayor ventilación
8	Aula	1000-1500 ppm			Recomendable mayor ventilación
9	Despacho	1000-1500 ppm	>400 index		Necesaria mayor ventilación
10	Secretaría	1000-1500 ppm			Recomendable mayor ventilación

Tabla 8. Espacios con necesidad de ventilación adicional.

Respecto a la **temperatura**, en el informe 25 se presenta una metodología para el análisis temperaturas (disponible en el visor Power Bi), a partir de los registros de sensoUZ. Para ello, en el intervalo de tiempo deseado, se analiza el porcentaje de tiempo en distintas franjas de temperatura, de forma análoga a los distintos contaminantes estudiados. Los rangos de temperatura según normativa se muestran en la figura 27.

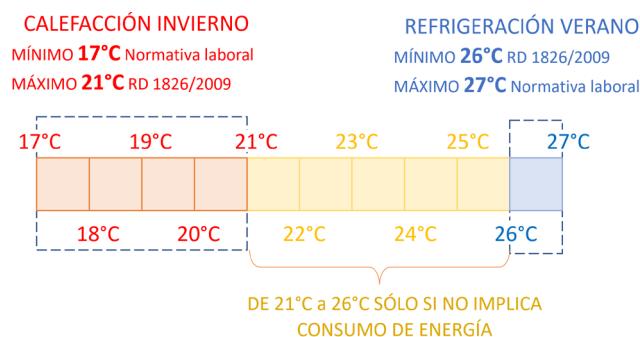


Figura 27. Rangos de temperaturas según normativa para los sistemas de climatización.

En la figura 28 se muestra un ejemplo del tipo de gráficos que se pueden obtener con la herramienta y que permite conocer el estado de los edificios en un instante o periodo de tiempo dado, verificando si están en rangos de temperatura adecuados, garantizando el confort y la eficiencia energética. También es posible detectar anomalías en espacios concretos, si las temperaturas están fuera de rango. Por último, permite analizar la evolución de las temperaturas del conjunto del edificio o de espacios concretos (enfriamiento o calentamiento, ver figura 29).

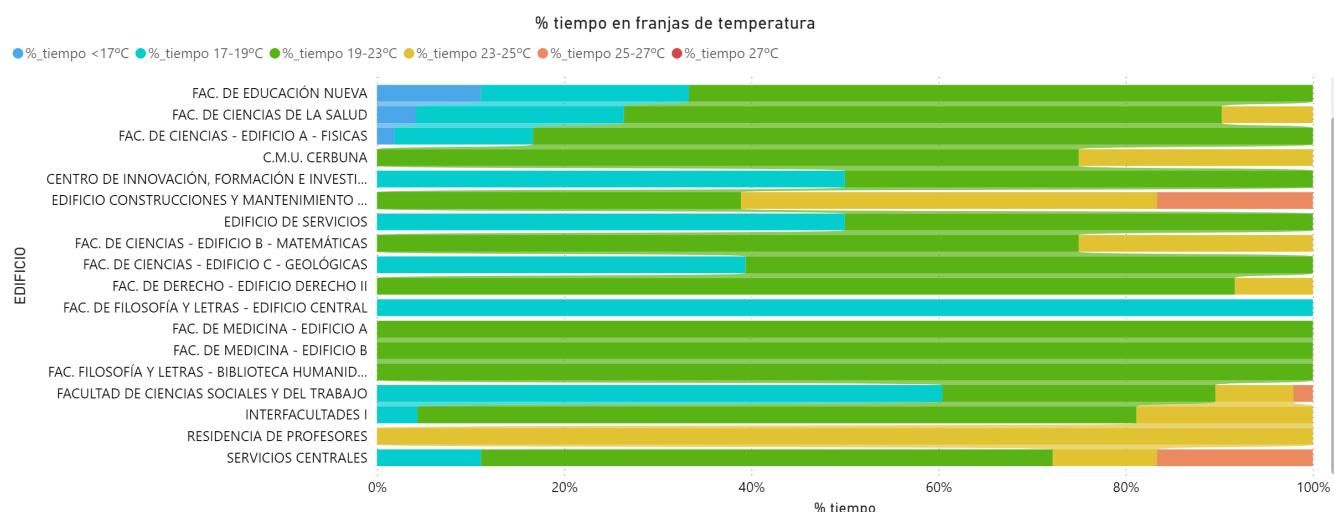


Figura 28. Comparativa de edificios. Ejemplo 26 de enero de 2024 entre las 9 y las 10 h.

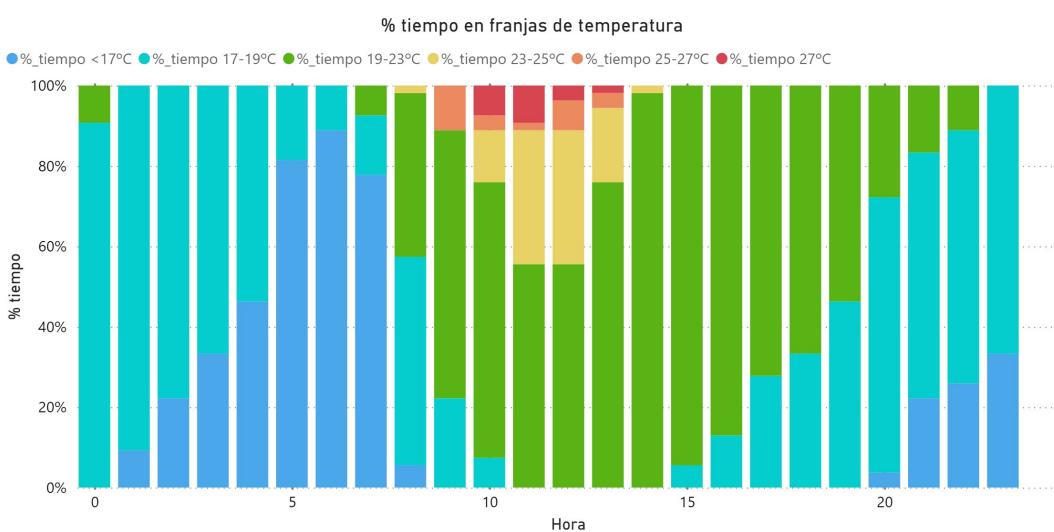


Figura 29. Evolución del porcentaje de tiempo en distintas franjas de temperatura por hora. Edificio Torres Quevedo (26/01/2024).

Conclusiones

1. Análisis de la inercia térmica

- 1.1. Gracias al desarrollo de una metodología para el cálculo de las pendientes de ascenso de la temperatura interior ($^{\circ}\text{C/h}$) en la franja de encendido de los sistemas de calefacción, se ha puesto de manifiesto que hay claras diferencias en el comportamiento de los edificios de la Universidad de Zaragoza, dado que las pendientes oscilan **entre 0,3 y 3 $^{\circ}\text{C/h}$ en promedio mensual** y entre 0,4 y 2,2 $^{\circ}\text{C/h}$ en promedio durante todo el periodo con datos disponibles, según el edificio.
- 1.2. El cálculo del valor de las pendientes tiene una **incertidumbre** asociada, que disminuye a mayor número de sensores y de pendientes calculadas. Influye el proceso de cálculo de las pendientes (detección de la franja de estudio y ajuste de los valores de temperatura a una recta) y la calidad de los datos remitidos por los sensores en cuanto a calibración, robustez de la infraestructura de transmisión y almacenamiento de datos.
- 1.3. Algunos de los motivos principales por los que existe diferencias en el comportamiento de los edificios, y por tanto, en el valor de las pendientes, son el **ratio entre la potencia instalada disponible y demanda térmica**, así como el tipo de sistema de climatización, dependiendo de si es por aire o por agua.
- 1.4. Para un mismo edificio también hay una variación a lo largo del tiempo y entre estancias en el valor de las pendientes. La variación a lo largo del tiempo está influenciada principalmente por la **temperatura exterior** y la temperatura **interior** de los edificios en el momento del arranque. La variación entre estancias está asociada a las características de las unidades terminales de cada espacio, a la situación de la estancia dentro del edificio (orientación, planta, etc.) y al tipo de cerramientos.
- 1.5. En la actualidad, los horarios de los sistemas de climatización se establecen en base a la previsión meteorológica, sin tener en cuenta el comportamiento térmico de cada edificio en particular. A partir de este trabajo, se propone agrupar los edificios que se comporten de forma similar, de cara a **plantear unos horarios de encendido de la climatización distintos para cada tipología**, garantizando la eficiencia energética y el confort térmico.
- 1.6. En base a este estudio y a los cálculos de pendientes, **se plantea una nueva metodología para establecer la hora de arranque de los sistemas de climatización de forma dinámica y en tiempo real**. Dada una temperatura interior objetivo de 19°C (modo calefacción) y el valor de pendiente, el sistema podría calcular el momento adecuado para arrancar los sistemas de climatización en función de la temperatura interior promedio del edificio.
- 1.7. A la hora de determinar cuándo deben arrancar las instalaciones, también se debería tener en cuenta el **desfase desde el arranque hasta que empieza a aumentar la temperatura interior**. En algunos espacios analizados, el desfase varía entre los **10 y los 30 minutos**.
- 1.8. El motivo por el que se ha propuesto un **modelo experimental** frente a un modelo físico, es debido a la complejidad de la realidad a modelizar y al gran número de variables inciertas que influyen. Esto hace que exista una gran diferencia entre las simulaciones y la realidad, lo que se denomina **Building energy performance gap**. Por todo ello, se considera más razonable avanzar hacia modelos híbridos o experimentales.

2. Calidad de aire interior

- 2.1. Se han utilizado equipos MICA de *inBiot*, **verificando previamente el funcionamiento de dichos sensores**, al comparar las mediciones entre ellos en una misma ubicación durante 43 días. Se han observado algunas **diferencias poco significativas** en las medidas de formaldehído (dentro del rango de precisión), así como en temperatura y humedad (ligeramente fuera del rango de precisión).
- 2.2. En el nuevo **edificio de Filosofía y Letras**, los porcentajes de tiempo por encima de 1000 ppm de **CO₂** son de hasta un 30 %, destacando el seminario B 3.2 por tener un porcentaje de tiempo por encima de 1500 ppm del 10%.
- 2.3. Los porcentajes de **TVOC** (Compuestos Orgánicos Totales) por encima del índice 400 index son elevados para el seminario B 3.2 y uno de los despachos, con hasta un 20% del tiempo en esta franja. Por otra parte, se observa un claro **aumento de los TVOC con la temperatura** y, en ciertos espacios, destaca la similitud en la **tendencia de los TVOC y del CO₂** (ocupación). En la secretaría del bloque A se producen picos de TVOC a primera hora de la mañana (7:00 h), debidos posiblemente a **ambientadores y/o fragancias de los productos de limpieza**, por lo que, considerando que son más los potenciales riesgos para la salud que los beneficios, se propone que no se utilicen en la UZ. En el informe 17 se puede consultar más información sobre VOCs relacionados con ambientadores.
- 2.4. El **formaldehído** presenta valores elevados en aulas como la A 3.2, con un 30% del tiempo en la franja 70-120 µg/m³, especialmente cuando no hay ocupación y al aumentar la temperatura interior. Por ello, se estima que el **mobiliario** puede ser la causa principal. Dichos niveles disminuyen cuando hay ocupación, gracias a la ventilación mecánica, aunque es insuficiente en muchos casos.
- 2.5. Las **partículas** no presentan valores elevados, salvo en alguna ocasión puntual, que puede estar relacionada con **incendios** cercanos a la localidad de Zaragoza (ver informe 23 en el anexo). La **humedad** está generalmente en el umbral deseado, estando en algunos casos por debajo del umbral inferior recomendado de 35%.
- 2.6. Se ha propuesto mantener un **caudal mínimo de ventilación** para combatir las fuentes de contaminación relacionadas con los materiales de construcción y el mobiliario, incrementándolo cuando las temperaturas son más altas. La cuantía de dicho caudal podría determinarse en base a un proceso iterativo de modificación del caudal y el posterior análisis de los datos de calidad de aire, hasta que se mantengan los contaminantes en niveles adecuados.
- 2.7. La metodología propuesta para el análisis de los registros de **temperatura** implementada en el visor Power Bi ofrece al usuario la capacidad de obtener información detallada sobre el estado actual o histórico de los edificios. Esta herramienta permite verificar si la temperatura está dentro de los rangos adecuados, pudiendo detectar anomalías en espacios concretos o errores en los sensores. También es una herramienta útil para verificar si los horarios de climatización planteados son los adecuados.

Líneas de futuro

A continuación, se enumeran distintas líneas de futuro agrupadas por análisis de la inercia térmica y calidad de aire interior.

1. Análisis de la inercia térmica

- 1.1. Se ha observado que las temperaturas exterior e interior en el momento del arranque de la climatización, así como el día de la semana, influyen en el valor de las pendientes. Como línea de futuro, se plantea crear **nuevas correlaciones con otras variables** climatológicas o con el estado de la instalación (por ejemplo, potencia disponible real, temperaturas de impulsión).
- 1.2. Analizar si tomar el **valor promedio de pendientes podría ser una buena aproximación para establecer la hora de arranque** de los sistemas de climatización, o si los factores de influencia son suficientemente relevantes, implicando una diferencia en el horario de encendido mayor a 15-30 minutos.
- 1.3. Para obtener el valor de las pendientes según las condiciones de estudio (temperatura exterior, interior, día de la semana, etc.), sería **conveniente establecer una relación matemática multivariable que defina el valor de las pendientes** en base a pendientes calculadas con condiciones similares. Para ello, se podrían utilizar las redes neuronales.
- 1.4. Sería conveniente **calcular de forma automatizada el desfase entre el arranque** de los sistemas de climatización **y el momento en el que empieza a aumentar la temperatura interior**, para obtener un valor promedio de desfase por edificio.
- 1.5. En base al procedimiento planteado, **llevar a cabo programaciones reales en los distintos edificios**, evaluando su comportamiento y ajustando el procedimiento mediante un **proceso de mejora continua**.
- 1.6. Extender el estudio de inercia térmica para analizar el proceso de **enfriamiento de los edificios**. También sería adecuado estudiar el comportamiento de los edificios en modo refrigeración.
- 1.7. Analizar o **cuantificar el ahorro** de energía y ahorro económico asociado a la **optimización de horarios**.

2. Calidad de aire interior

- 2.1. Calcular los porcentajes de tiempo en el que los distintos contaminantes se encuentran en las franjas definidas, **filtrando únicamente el intervalo de tiempo en el que haya ocupación**. Sería interesante vincular los datos de ocupación provenientes de la aplicación “Reserva de aulas” o de sensores de ocupación (en caso de que haya).
- 2.2. En caso de disponer de datos de ocupación, **correlacionar el número de ocupantes con los distintos parámetros de calidad de aire interior**.
- 2.3. Buscar **nuevas correlaciones** entre los distintos parámetros monitorizados, como se ha hecho con los TVOC y la temperatura.
- 2.4. Colocar sensores de calidad de aire en **nuevas ubicaciones** del edificio de Filosofía y Letras y de otros edificios, para analizar un mayor número de espacios. Una opción más económica sería **trasladarlos**.
- 2.5. Vincular los sensores con los sistemas **BMS** del edificio (SCADA), de forma que se pueda regular el caudal de ventilación con un mayor número de parámetros (no sólo el CO₂). Para ello existen distintos protocolos como el Modbus RTU (comunicación cableada) o Modbus TCP/IP (comunicación inalámbrica), BACnet o KNX.

Bibliografía

- [1] “Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible.” Accessed: May 29, 2022. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [2] Comisión Europea. Departamento de energía., “La eficiencia energética de los edificios.” Accessed: Apr. 28, 2024. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/document/download/65660913-cecb-4f2f-b34c-c9bbf9bed1af_es?filename=in_focus_energy_efficiency_in_buildings_es.pdf
- [3] “The European Parliament and the Council, Directive 2002/91/CE, Relative to the Energy Efficiency in Buildings. 2002.” Accessed: May 04, 2024. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32002L0091>
- [4] “United Nations Environment Programme, Global Alliance for Buildings and Construction.” Accessed: Apr. 28, 2024. [Online]. Available: <https://globalabc.org/>
- [5] “International Energy Agency, Buildings.” Accessed: Apr. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/buildings>
- [6] “Roadmap for Energy-Efficient Buildings and Construction in ASEAN Timelines and actions towards net zero-carbon buildings and construction”, Accessed: May 11, 2024. [Online]. Available: www.iea.org/t&c/
- [7] U. N. E. Programme, “2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector,” *United Nations Environment Programme*, p. v, 2022, Accessed: May 11, 2024. [Online]. Available: <https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/41133>
- [8] Comisión Europea, “Eficiencia energética de los edificios: nueva ley para descarbonizar el sector.” Accessed: Apr. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/press-room/20240308IPR19003/eficiencia-energetica-de-los-edificios-nueva-ley-para-descarbonizar-el-sector>
- [9] “Eficiencia energética de los edificios Evaluación global de la eficiencia energética de los edificios Parte 1: Marco general y procedimientos (ISO 52000-1:2017).” Accessed: May 02, 2024. [Online]. Available: <https://plataforma-aenormas-aenor-com.cuarzo.unizar.es:9443/standard/UNE/N0061777>
- [10] H. Li, T. Hong, S. H. Lee, and M. Sofos, “System-level key performance indicators for building performance evaluation,” *Energy Build*, vol. 209, p. 109703, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2019.109703.
- [11] “Directiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética.” Accessed: May 04, 2024. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0844>
- [12] A. Gupta, Y. Badr, A. Negahban, and R. G. Qiu, “Energy-efficient heating control for smart buildings with deep reinforcement learning,” *Journal of Building Engineering*, vol. 34, p. 101739, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.JBEM.2020.101739.
- [13] “Leveraging Machine Learning and Big Data for Smart Buildings: A Comprehensive Survey.” Accessed: May 02, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/334286607_Leveraging_Machine_Learning_and_Big_Data_for_Smart_Buildings_A_Comprehensive_Survey
- [14] K. Alanne and S. Sierla, “An overview of machine learning applications for smart buildings,” *Sustain Cities Soc*, vol. 76, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.scs.2021.103445.
- [15] “Smart Readiness Indicator for Buildings.” Accessed: Oct. 15, 2022. [Online]. Available: <https://smartreadinessindicator.eu/>
- [16] “Smart readiness indicator - European Commission.” Accessed: May 03, 2024. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/smart-readiness-indicator_en

- [17] P. A. Fokaides, C. Panteli, and A. Panayidou, "How Are the Smart Readiness Indicators Expected to Affect the Energy Performance of Buildings: First Evidence and Perspectives," *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 9496, vol. 12, no. 22, p. 9496, Nov. 2020, doi: 10.3390/SU12229496.
- [18] B. ; Lucas Bonilla *et al.*, "A Methodology for Designing an Automated System to Improve the Thermal Performance of a Large Building in Operation," *Buildings* 2023, Vol. 13, Page 1938, vol. 13, no. 8, p. 1938, Jul. 2023, doi: 10.3390/BUILDINGS13081938.
- [19] "Papel de la IA y tendencias en integración de sistemas - Climatización e instalaciones." Accessed: May 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.interempresas.net/Climatizacion/Articulos/559133-Papel-de-la-IA-y-tendencias-en-integracion-de-sistemas.html>
- [20] "Sistema de Certificados de Ahorro Energético (CAE)." Accessed: May 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/eficiencia/cae.html>
- [21] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, "A review on buildings energy consumption information," *Energy Build*, vol. 40, no. 3, pp. 394–398, Jan. 2008, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2007.03.007.
- [22] W. Li, H. Li, and S. Wang, "An event-driven multi-agent based distributed optimal control strategy for HVAC systems in IoT-enabled smart buildings," *Autom Constr*, vol. 132, p. 103919, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.AUTCON.2021.103919.
- [23] M. Fadzli Haniff, H. Selamat, R. Yusof, S. Buyamin, and F. Sham Ismail, "Review of HVAC scheduling techniques for buildings towards energy-efficient and cost-effective operations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 94–103, Nov. 2013, doi: 10.1016/J.RSER.2013.06.041.
- [24] J. Al Dakheel, C. Del Pero, N. Aste, and F. Leonforte, "Smart buildings features and key performance indicators: A review," *Sustain Cities Soc*, vol. 61, p. 102328, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.SCS.2020.102328.
- [25] T. Zhang, M. P. Wan, B. F. Ng, and S. Yang, "Model predictive control for building energy reduction and temperature regulation," *IEEE Green Technologies Conference*, vol. 2018-April, pp. 100–106, Jun. 2018, doi: 10.1109/GREENTECH.2018.00027.
- [26] W. Shen, H. Henry Xue, G. Newsham, and E. Dikel, "Smart building monitoring and ongoing commissioning: A case study with four Canadian federal government office buildings," *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2017*, vol. 2017-January, pp. 176–181, Nov. 2017, doi: 10.1109/SMC.2017.8122598.
- [27] J. Crawley, A. Martin-Vilaseca, J. Wingfield, Z. Gill, M. Shipworth, and C. Elwell, "Demand response with heat pumps: Practical implementation of three different control options," *Building Serv. Eng. Res. Technol.* 2023, vol. 44, no. 2, pp. 211–228, 2019, doi: 10.1177/01436244221145871.
- [28] "Topical Article: Efficiency and Flexibility: A UK Perspective on Heat Pumps in the Electricity System - HPT - Heat Pumping Technologies." Accessed: May 11, 2024. [Online]. Available: https://heatpumpingtechnologies.org/heat-pumping-technologies-magazine-vol-42-no-1-2024/topical-article-efficiency-and-flexibility-a-uk-perspective-on-heat-pumps-in-the-electricity-system/?utm_campaign=Heat+Pumping+Technologies+MAGAZINE%2c+Vol.42+No.+1%2f2024&utm_medium=email&utm_source=lime-newsletter
- [29] R. Halvgaard, N. K. Poulsen, H. Madsen, and J. B. Jørgensen, "Economic Model Predictive Control for building climate control in a Smart Grid," *Innovative Smart Grid Technologies, IEEE PES*, pp. 1–6, Jan. 2012, doi: 10.1109/ISGT.2012.6175631.
- [30] "Why Indoor Air Quality is Important to Schools | US EPA." Accessed: May 24, 2022. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/iaq-schools/why-indoor-air-quality-important-schools>
- [31] M. Á. Campano, J. Fernández-Agüera, and J. J. Sendra, *Calidad del aire interior en los edificios para el bienestar: estrategias de aplicación práctica*. Octaedro, 2023. Accessed: May 19, 2024. [Online]. Available: <https://octaedro.com/libro/calidad-del-aire-interior-en-los-edificios-para-el-bienestar-estrategias-de-aplicacion-practicas/>

- [32] “Ventilation Rates and Absences in Offices and Schools | Indoor Air.” Accessed: May 19, 2024. [Online]. Available: https://iaqscience.lbl.gov/ventilation-rates-and-absences-offices-and-schools#_ENREF_1
- [33] D. K. MILTON, P. M. GLENROSS, and M. D. WALTERS, “Risk of Sick Leave Associated with Outdoor Air Supply Rate, Humidification, and Occupant Complaints,” *Indoor Air*, vol. 10, no. 4, pp. 212–221, Dec. 2000, doi: 10.1034/J.1600-0668.2000.010004212.X.
- [34] “El observatorio de Izaña vuelve a registrar en mayo de 2021 un máximo histórico en la concentración de dióxido de carbono (CO₂) | Aemetblog.” Accessed: May 19, 2024. [Online]. Available: <https://aemetblog.es/2021/06/21/el-observatorio-de-izana-vuelve-a-registrar-en-mayo-de-2021-un-maximo-historico-en-la-concentracion-de-dioxido-de-carbono-co2/>
- [35] “UNE 171380:2024 Medición en continuo de CO₂ en interiores para la prevención en salud y mejora del bienestar.” Accessed: May 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0072394>
- [36] P. WARGOCKI, D. P. WYON, J. SUNDELL, G. CLAUSEN, and P. O. FANGER, “The Effects of Outdoor Air Supply Rate in an Office on Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity,” *Indoor Air*, vol. 10, no. 4, pp. 222–236, Dec. 2000, doi: 10.1034/J.1600-0668.2000.010004222.X.
- [37] M. José Berenguer Subils Licenciada en Ciencias Químicas Félix Bernal Domínguez, “NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior.”
- [38] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, “RITE - Reglamento instalaciones térmicas en los edificios.” Accessed: May 24, 2022. [Online]. Available: <https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Paginas/InstalacionesTermicas.aspx>
- [39] R. Jaenicke, “Ernö Mészáros: Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry.” Accessed: May 19, 2024. [Online]. Available: https://www.academia.edu/29954553/Ern%C3%B6_M%C3%A9sz%C3%A1ros_Fundamentals_of_Atmospheric_Aerosol_Chemistry
- [40] “Partículas en suspensión. inBiot.” Accessed: May 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.inbiot.es/wikinbiot/particulate-matter>
- [41] R. Bascom, T. K. Fitzgerald, J. Kesavanathan, and D. L. Swift, “A Portable Air Cleaner Partially Reduces the Upper Respiratory Response to Sidestream Tobacco Smoke,” *Appl Occup Environ Hyg*, vol. 11, no. 6, pp. 553–559, 1996, doi: 10.1080/1047322X.1996.10389373.
- [42] “Compuestos orgánicos volátiles. Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico.” Accessed: May 19, 2024. [Online]. Available: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/act-emis/compuestos_organicos_volatile.html
- [43] “AGÖF Guidance Values for Volatile Organic Compounds in Indoor Air Edition,” 2013, Accessed: May 25, 2024. [Online]. Available: http://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2012_106.pdf
- [44] “Ozono.” Accessed: May 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.inbiot.es/wikinbiot/ozone>
- [45] “Gas radón y efectos - Instituto para la Salud Geoambiental.” Accessed: May 25, 2024. [Online]. Available: https://www.saludgeoambiental.org/gas-radon-y-efectos/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwmMayBhDuARIsAM9HM8cuQWcJm0WkqcRj16mqcRY8AIrET6f-NTCfELQ8jnDLEHKMV1E0mkaAgd3EALw_wcB
- [46] “Plan Nacional contra el Radón,” 2024.
- [47] “WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.” Accessed: May 25, 2024. [Online]. Available: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [48] “Y si además de pensar en la sostenibilidad del edificio pensamos también en el bienestar de sus ocupantes... - Climatización e instalaciones.” Accessed: May 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.interempresas.net/Climatizacion/Articulos/558970-Y-si-ademas-pensar-sostenibilidad-edificio-pensamos-tambien-bienestar-ocupantes.html>

- [49] I. Uriarte, A. Erkoreka, A. Legorburu, K. Martin-Escudero, C. Giraldo-Soto, and M. Odriozola-Maritoren, "Decoupling the heat loss coefficient of an in-use office building into its transmission and infiltration heat loss coefficients," *Journal of Building Engineering*, vol. 43, p. 102591, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.JBODE.2021.102591.
- [50] M. Herrando, D. Cambra, M. Navarro, L. de la Cruz, G. Millán, and I. Zabalza, "Energy Performance Certification of Faculty Buildings in Spain: The gap between estimated and real energy consumption," *Energy Convers Manag*, vol. 125, pp. 141–153, Oct. 2016, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2016.04.037.