



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES  
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**APROVECHAMIENTO REAL DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR  
TIERRA-AIRE; CASO DE ESTUDIO: EDIFICIO LUCIA**

Autor: D. Jorge Martín Gutiérrez

Tutor: Dña. Ana Tejero González

Tutor: Dña. Paula Matilde Esquivias Fernández

Valladolid, mayo, 2021

---



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES  
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**APROVECHAMIENTO REAL DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR  
TIERRA-AIRE; CASO DE ESTUDIO: EDIFICIO LUCIA**

Autor: D. Jorge Martín Gutiérrez

Tutor: Dña. Ana Tejero González

Tutor: Dña. Paula Matilde Esquivias Fernández

Valladolid, mayo, 2021

---

## RESUMEN

---

Los EAHE son sistemas de pre-tratamiento térmico del caudal de aire exterior de ventilación que aprovechan la inercia térmica del terreno, por lo que permiten reducir el consumo energético necesario para alcanzar las condiciones de confort térmico en los espacios acondicionados interiores.

Es una tecnología que permite mejorar la eficiencia energética de las Instalaciones Térmicas, reduciendo las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>. Así pues, puede ser útil para conseguir los objetivos europeos de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

La Universidad de Valladolid ha implantado EAHE en algunos de sus nuevos edificios, entre los que se encuentra el edificio LUCIA. No obstante, actualmente, la información sobre el comportamiento de este tipo de intercambiadores en el clima mediterráneo es escasa, por lo que profundizar en el EAHE de este caso de estudio puede resultar una interesante contribución.

El edificio LUCIA cuenta con un SCADA para monitorizar y controlar el funcionamiento de sus instalaciones térmicas, pero los datos que recoge respecto al EAHE no permiten conocer la transferencia de calor. Con el objetivo de conocer su comportamiento y aprovechamiento real se ha efectuado una campaña de mediciones, que complementa la información obtenida del SCADA.

Como resultado se obtiene que la implantación del EAHE en el edificio LUCIA supone una reducción del 17% del consumo en calefacción (diciembre, enero y febrero), y del 10% en refrigeración (julio), lo cual supone evitar 665 kg emisiones de CO<sub>2</sub>, con una inversión de 0,5% del presupuesto de ejecución material del edificio.

### **PALABRAS CLAVE**

Intercambiador de calor Tierra-Aire; ahorro económico; reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>; aprovechamiento; edificio LUCIA.

## ABSTRACT

---

The EAHE are systems for the thermal pre-treatment of the external ventilation air flow that take advantage of the thermal inertia of the ground, thus reducing the energy consumption necessary to achieve the conditions of thermal comfort in the interior conditioned spaces.

It is a technology that improves the energy efficiency of Thermal Installations, reducing the equivalent emissions of CO<sub>2</sub>. Therefore, it can be useful to achieve the European CO<sub>2</sub> emission reduction targets.

The University of Valladolid has implemented EAHE in some of its new buildings, among which is the LUCIA building. However, currently, information on the behaviour of this type of exchangers in the Mediterranean climate is scarce, so delving into the EAHE of this case study may be an interesting contribution.

The LUCIA building has a SCADA to monitor and control the operation of its thermal installations, but the data it collects regarding the EAHE does not allow to know the heat transfer. In order to know its behaviour and real use, a measurement campaign has been carried out to complement the information obtained from the SCADA.

As a result, it is obtained that the implementation of the EAHE in the LUCIA building equals to a reduction of 17% of the consumption in heating (December, January and February), and of 10% in cooling (July), which means avoiding 665 kg CO<sub>2</sub> emissions, with an investment of 0.5% of the budget for the material execution of the building.

### KEYWORDS

Earth-To-Air heat exchanger; economic savings; reduction of CO<sub>2</sub> emissions; exploitation; LUCIA building.

## **AGRADECIMIENTOS**

---

En primer lugar, quiero agradecer al personal de la Universidad que, de alguna forma u otra ha colaborado conmigo en el desarrollo de este trabajo, como Eloy Velasco, o Sergio Lorenzo. En este ámbito, merecen una mención especial mis dos tutoras, Ana Tejero y Paula Esquivias, que han demostrado una gran paciencia conmigo.

Por otro lado, no puedo dejar de mencionar a mis amigos, quienes me ayudaban de mil formas diferentes cuando la situación se ponía cuesta arriba.

Y finalmente, pero no por ello menos importante (de hecho, todo lo contrario), mi gran agradecimiento va dedicado a mi familia, que ha soportado mi día a día, porque, aunque seguro que yo no sea consciente, seguro que no siempre ha sido fácil.



# Índice

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Justificación .....	1
1.2	Objetivos.....	1
1.2.1	General .....	1
1.2.2	Específicos .....	1
1.3	Antecedentes .....	2
2	ESTADO DE LA TÉCNICA .....	5
2.1	Eficiencia energética.....	5
2.1.1	Normativa europea .....	5
2.1.2	Normativa nacional (España) .....	6
2.1.3	Calidad del Aire Interior .....	7
2.1.4	Tecnologías que reducen el consumo del tratamiento del aire de impulsión utilizando energías renovables .....	8
2.2	Consumo energético asociado al Tratamiento del Aire de Ventilación .....	12
3	METODOLOGÍA.....	15
3.1	Caso de estudio: edificio LUCIA.....	15
3.1.1	Descripción de la instalación .....	17
3.2	Caracterización del intercambiador .....	18
3.3	Adquisición de datos .....	19
3.3.1	Sondas utilizadas .....	21
3.3.2	Software .....	25
3.4	Campaña de medición.....	26
4	RESULTADOS .....	31
4.1	Mediciones de las sondas.....	31
4.2	Mediciones de SCADA: apertura de las compuertas.....	35
4.3	Cruce de datos: medición de sondas y apertura de compuertas.....	42
4.3.1	Refrigeración .....	47
4.3.2	Calefacción .....	49
4.4	Coste relativo del EAHE .....	51
5	CONCLUSIONES .....	53
5.1	Caracterización del EAHE.....	53
5.2	Principales aportaciones del autor del TFM.....	53
5.3	Sugerencias para trabajos futuros.....	55
6	BIBLIOGRAFÍA.....	57





# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Justificación

La motivación del presente Trabajo de Fin de Máster radica en ampliar los conocimientos respecto al uso real de los intercambiadores Tierra-Aire para el pre-acondicionamiento del aire en climas mediterráneos.

En línea con el párrafo anterior, puede resultar relevante indagar sobre la realidad de este tipo de sistemas, y conocer cuánto se usan, qué beneficios aportan, qué desventajas acarrearán, si es verdaderamente una energía limpia, etc.

Este tipo de sistemas pasivos de tratamiento de aire tiene especial interés en el contexto global actual y su dinámica evolutiva; los intercambiadores de calor Tierra-Aire se caracterizan por consumos energéticos y niveles de emisiones muy inferiores a los de otros tipos de soluciones, lo que los convierte en idóneos para frenar el calentamiento global del planeta, que traerá consigo estaciones cálidas más prologadas e intensas, con el consiguiente aumento del uso de sistemas de refrigeración de aire, asociados directamente con las emisiones de CO<sub>2</sub> [1]. Paralelamente, el incremento de las emisiones agravará el calentamiento global, luego se trata de una problemática muy peligrosa, ya que se retroalimenta a sí misma. [2]

Según afirman los expertos, el efecto del Cambio climático está desplazando lentamente la clasificación de clima mediterráneo a latitudes tradicionalmente más frías. Aparte de la intensificación de las olas de calor y su frecuencia, acentuadas por el fenómeno de “isla de calor”, también se prevén inviernos más fríos y con lluvias esporádicas pero torrenciales. Consecuentemente, es posible que el desplazamiento de las zonas climáticas acarree consigo migraciones de población, generando grandes urbes que fomenten la “isla de calor”. Toda esta sucesión de fenómenos está directamente relacionada con el incremento de las emisiones de CO<sub>2</sub>, de ahí la importancia de actuar sobre este factor [3].

Además, aunque cada vez se instalan más intercambiadores Tierra-Aire, apenas hay estudios sobre la aplicación de este tipo de intercambiadores en climas mediterráneos, a pesar de que es una tecnología de bajo coste y relativamente fácil de implementar, especialmente en edificios de nueva construcción, por lo que el margen de aportación es alto.

Afortunadamente, La Universidad de Valladolid (UVA), cuenta con dos edificios en Valladolid que integran esta tecnología de pre-acondicionamiento pasivo del aire. Concretamente, se estudiará en detalle el intercambiador Tierra-Aire del edificio LUCIA, ubicado en el Campus Miguel Delibes, con el fin de conocer su aprovechamiento (grado de utilidad) en condiciones reales.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 General

Conocer el funcionamiento real y estudiar el impacto económico, energético y medioambiental del intercambiador Tierra-Aire del edificio LUCIA.

### 1.2.2 Específicos

- Identificar los parámetros que caracterizan el intercambio de calor Tierra-Aire, especialmente los relacionados con las condiciones de contorno, derivadas de la construcción, en un clima mediterráneo Csb (clasificación climática Köppen-Geiger), como es el de Valladolid.

- Cuantificar la variación de la Temperatura del aire en el intercambiador Tierra-Aire instalado en el edificio LUCIA de la Universidad de Valladolid.
- Correlacionar las variaciones de temperatura con los parámetros característicos de los intercambiadores Tierra-Aire.
- Identificar las franjas horarias de máximo y mínimo aprovechamiento.
- Analizar el patrón de utilización del intercambiador Tierra-Aire instalado en el edificio LUCIA de la Universidad de Valladolid.
- Calcular el impacto económico y medioambiental del intercambiador Tierra-Aire instalado en el edificio LUCIA de la Universidad de Valladolid.

### 1.3 Antecedentes

El presente Trabajo Fin de Máster se realiza en el marco del proyecto de investigación VA272P18 “ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAMENTE EFICIENTES PARA LA SOSTENIBILIDAD DE LOS EDIFICIOS” que desarrolla el Grupo de Termotecnia de la Universidad de Valladolid.

En este proyecto, cofinanciado por la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional, se investigan y desarrollan tecnologías de climatización eficientes, así como su implantación práctica, con dos ramales básicos diferenciados: por un lado, la sustitución de fuentes convencionales por renovables, entre las cuales se encuentran los intercambiadores Tierra-Aire objeto de estudio de este TFM, y, por otro lado, la reducción de la demanda.

El objetivo principal del Grupo consiste en mejorar la eficiencia energética de las instalaciones de climatización de los edificios, sin dejar de lado la calidad del aire interior y el confort térmico. Para ello, entre otras acciones, se investigan posibles alternativas energéticas, y metodologías de recuperación de energía. Concretamente, entre sus líneas de investigación, las más próximas a este proyecto son las que tratan sobre tecnologías de sistemas de climatización, eficiencia energética en edificios, e integración de energías renovables en edificios.

También se destaca, por su relación con este trabajo, el proyecto de investigación “LA UNIVERSIDAD DE VALLADOLID HACIA UN SISTEMA ENERGÉTICO SOSTENIBLE: ALTA CALIDAD AMBIENTAL INTERIOR, COMPETITIVO Y DESCARBONIZADO” (2019-2020), producto de la participación en un programa de ayudas de proyectos de I+D+i sobre medidas de Eficiencia Energética, y sobre la aplicación de Energías Renovables en edificios de la UVa. En él, se apuesta por implementar una metodología dedicada a evolucionar a edificios nZEB (nearly Zero Energy Building o, en español, Edificios de Consumo Energético Casi Nulo), como el que se estudia en este TFM, que conserven una alta Calidad Ambiental Interior (CAI), un bajo impacto ambiental, y sean competitivos a nivel energético.

Además, el Grupo también es un difusor activo de conocimiento, como demuestran sus artículos publicados en revistas científicas. Algunos de los que han sentado las bases de este TFM son:

- SMART ENERGY MANAGEMENT OF COMBINED VENTILATION SYSTEMS IN A NZEB (2019), en la revista E3S Web of Conferences 2019, nº 111. En él se analizan diferentes estrategias para mejorar la eficiencia de ventilación operativas en el edificio nZEB de

la UVa LUCIA (que cuenta con los intercambiadores Tierra-Aire analizados en este TFM), a través de la monitorización de distintos parámetros (temperatura, velocidad del aire, entalpía, etc.).

- MONITORING DATA STUDY OF THE PERFORMANCE OF RENEWABLE ENERGY SYSTEMS IN A NEAR ZERO ENERGY BUILDING IN SPAIN: A CASE STUDY (2018), en la revista *Energies* 2018, 11(11), 2979. En vista del gran porcentaje de emisiones de CO<sub>2</sub> atribuidas al sector de la construcción, se monitorizaron las necesidades energéticas (y su coste económico), así como las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas, del edificio nZEB LUCIA, de la UVa. Las conclusiones apuntan a la gran influencia que tiene el clima del lugar, las características del edificio y el algoritmo de control de las condiciones de confort interior, a la hora de elaborar una estrategia de diseño de edificios nZEB. Así mismo, defendía el uso de ciertas tecnologías combinadas, entre las cuales se encuentran los intercambiadores Tierra-Aire, como herramienta para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y el coste económico del consumo energético.
- MODELLING THE LONG-TERM EFFECT OF CLIMATE CHANGE ON A ZERO ENERGY AND CARBON DIOXIDE BUILDING THROUGH ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLES (2018), publicado en la revista *Energy and Buildings* 2018, 174, 85-96. En él, además de otros aspectos, se comentan el aumento significativo de la demanda de sistemas de refrigeración y su tiempo de uso, como se ha adelantado en la introducción de este TFM, y se sugiere la idea de pensar en posibles soluciones alternativas que anticipen los problemas futuros, dónde, por ejemplo, podemos recurrir a la recuperación pasiva de energía, como es el caso de los intercambiadores Tierra-Aire que analiza este TFM.
- ENERGY ANALYSIS AT A NEAR ZERO ENERGY BUILDING. A CASE-STUDY IN SPAIN (2018), publicado en la revista *Energies* 2018, 11(4), 857. En este artículo se analiza energéticamente el edificio nZEB LUCIA, localizando en el Campus Miguel Delibes de la UVa (Valladolid). Se trata del edificio estudiado en este TFM, ya que cuenta con un intercambiador Tierra-Aire.
- ASSESSING THE APPLICABILITY OF PASSIVE COOLING AND HEATING TECHNIQUES THROUGH CLIMATE FACTORS: AN OVERVIEW (2016), que fue publicado en la revista *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016, 65(1), 727-742. Constituye una guía para elegir las tecnologías energéticas pasivas más adecuadas en edificios en función del clima de la zona en la que se construya.

Para conocer más sobre el Grupo de Termotecnia de la Universidad de Valladolid, por ejemplo las tesis desarrolladas, se puede consultar su página web [4], donde se encuentra publicada toda la información anterior, así como la documentación que no guarda una relación tan estrecha con el presente TFM, pero que puede resultar igualmente interesante.



## 2 ESTADO DE LA TÉCNICA

A día de hoy, las directrices marcadas por la Unión Europea (UE) determinan la dirección a seguir por los países miembros en multitud de ámbitos. Uno de ellos es el compromiso medioambiental, en el que esta institución actúa de motor, siendo un integrante activo del Protocolo de Kioto [5] (activo hasta 2020), e impulsor del Acuerdo de París de 2015 (continuación del Protocolo de Kioto), y del Pacto Verde Europeo [6] (con la que “La UE será climáticamente neutral en 2050”, según las palabras de la propia Comisión Europea). Con el propósito de cumplir con estos acuerdos, las indicaciones europeas abogan por aumentar la eficiencia energética de los edificios y reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Entre las técnicas que pueden resultar de utilidad se encuentran los intercambiadores de calor Tierra-Aire. Estos se basan en la estabilidad térmica del terreno para pre-acondicionar el aire exterior, de forma que se reduce la energía necesaria para tratarlo térmicamente antes de impulsarlo a los espacios interiores acondicionados.

Se presenta a continuación la revisión de la literatura relativa al comportamiento y eficiencia de estos intercambiadores y sus parámetros característicos.

### 2.1 Eficiencia energética

Demostrando su compromiso medioambiental, la Unión Europea lleva años tomando medidas para reducir su impacto negativo sobre el planeta. Entre otros aspectos, se interesa por la gran cantidad de energía que se desaprovecha, lo que se traduce en unos consumos energéticos superiores a los que serían necesarios en condiciones de aprovechamiento ideales. Es decir, pone en valor que no se está siendo todo lo eficientes que se debería, y trata de actuar al respecto.

En concreto, pone el foco en los edificios, origen del 40% del consumo de energía (cabeza de lista), y responsables del 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero de la Unión. Además, se estima que el 75% del parque inmobiliario europeo es energéticamente ineficiente, y que una renovación de los edificios ya construidos podría conducir a una reducción del 5-6% del total de energía consumida, y del 5% de las emisiones de CO<sub>2</sub> [7].

Los principales documentos que establecen el marco legislativo de esta transformación son las directivas “Eficiencia energética de los edificios” (Energy Performance of Buildings Directive o EPBD, 2010/31/UE), y “Eficiencia energética” (Energy Efficiency Directive, 2012/27/UE) [8], [9].

Su contenido, junto con el impacto a nivel nacional se detalla a continuación.

#### 2.1.1 Normativa europea

Las directivas mencionadas han marcado una serie de objetivos que los países miembros se han comprometido a cumplir. La Directiva sobre eficiencia energética 2012/27/UE [10] establece un marco de medidas para fomentar la eficiencia energética para poder alcanzar los Objetivos Europeos de Clima y Energía (Objetivos 20-20-20), y establece los objetivos nacionales de eficiencia energética para 2020 del 20% respecto al año base 2007. En términos prácticos, se traduce en que la energía final consumida en la UE no debía sobrepasar los 1086 millones de toneladas de petróleo equivalente (Mtoe), y la energía primaria consumida no debía sobrepasar las 1483 Mtoe. La Directiva (UE) 2018/844 [11], junto con la Directiva UE 2018/2002 [12], publicada tan solo meses después, incluyeron el compromiso de incrementar la eficiencia hasta el 32.5% para 2030 (con respecto a las previsiones).

Una de las medidas incluidas en las publicaciones más recientes, que respalda la involucración de la UE en el cambio de tendencia, dictamina que los edificios de nueva construcción deben consumir, al menos, la mitad de energía de lo que lo hacían en 1980, con el consiguiente ahorro económico [13].

No obstante, la realidad no siempre coincide con lo planeado, y es que, en vista del crecimiento entre 2014-2017, las previsiones iniciales no se cumplirán, según los datos de Eurostat de abril de 2019, siendo España uno de los responsables [14], lo que justifica aún más el interés en desarrollar técnicas de ahorro como los intercambiadores Tierra-Aire, protagonistas de este trabajo.

### 2.1.2 Normativa nacional (España)

La transposición de la Directiva Europea 2010/31/UE de Eficiencia Energética de Edificios al marco legislativo español dio lugar a la modificación del Documento Básico Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación (Orden FOM/1635/2013) para incorporar los requisitos mínimos de eficiencia energética de los edificios y establecer el camino hacia los edificios de consumo de energía casi nulos [21]; la extensión de la Certificación energética a edificios existentes (RD 235/2013) [19]; y a la modificación del Reglamento de Instalaciones Térmicas de los edificios (RD 238/2013) para incorporar cuestiones relativas a la inspección periódica de las instalaciones y a los sistemas de control [20].

La transposición de la Directiva 2012/27/UE de Eficiencia Energética al marco español tuvo como resultado el Plan Nacional de Acción de dio lugar a la publicación de diversas normas relativas a: Auditorías energéticas (Real Decreto 56/2016), Adquisiciones Sector Público (Ley 15/2014); Fondo nacional de Eficiencia Energética (Ley 18/2014) destinado a financiar los programas de eficiencia energética en edificios e infraestructuras públicas y viviendas; Electricidad de fuentes renovables y cogeneración (Orden IET/931/2015); y Fomento de Biocarburantes (Real Decreto 1085/2015).

Además, la Directiva 2012/27/UE exige la presentación de un Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética (PNAEE), que se debe actualizar cada 3 años, así como la Directiva 2010/31/UE exige la elaboración de una Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España (ERESEE), que también se debe actualizar cada 3 años [15].

La versión más reciente del PNAEE [16] data de 2017, puesto que debido al COVID-19, aún no se ha publicado la actualización prevista para abril de 2020. En la última versión vigente se resume la evolución de los consumos de energía primaria y final hasta 2015 y las medidas de actuación para cumplir con el compromiso de 2020, entre las que se encuentran diversos programas de ayudas para la Rehabilitación Energética de Edificios Existentes (PAREER CRECE) [17], la financiación de proyectos urbanos de eficiencia energética y de uso de las energías renovables (JESSICA-F.I.D.A.E.), o la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> de los edificios de ocupación turística (Plan PIMA Sol) [18], entre otros.

Por otro lado, la última versión de la ERESEE [3] de 2020, fija en el 2050 la fecha límite para transformar el parque inmobiliario actual (público, privado, residencial y no residencial), a edificios de alta eficiencia energética y libres de emisiones de carbono. Entre sus puntos principales se encuentra un análisis del estado del conjunto de los edificios actualmente construidos, con sus consumos y fallas, y las soluciones ya ratificadas en proceso de implantación.

Entre sus medidas, se incluyen ayudas económicas para fomentar la mejora de la eficiencia energética y sostenibilidad en vivienda [19] y fomentar la regeneración y renovación urbana y rural, entre otros.

Entre las medidas de mejora de eficiencia energética de edificios destaca, en el ámbito de este trabajo, la mejora de las instalaciones térmicas de los edificios.

No obstante, y debido a que se trata de un plan de actuación a largo plazo, también aparecen nuevas posibles vías de continuidad de este plan, articuladas en distintos ejes (estructurante, legislativo, económico, ...), como por ejemplo coordinar las transposiciones nacionales a los ámbitos regionales y locales, dar ejemplo rehabilitando (energéticamente) edificios públicos, o valorando una fiscalidad favorable a este tipo de obras.

### 2.1.3 Calidad del Aire Interior

La calidad del aire interior, IAQ, por sus siglas en inglés (Indoor Air Quality), es el concepto por el que se determina la idoneidad del aire que se encuentra dentro y en los alrededores de un edificio [20]. Para discriminar entre un aire de calidad frente a otro que no lo es se pueden valorar varios medidores: niveles de formaldehído (compuestos orgánicos volátiles o COV), niveles de material particulado, niveles de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), niveles de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), y niveles de óxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Entre los más extendidos se encuentran los sensores de CO<sub>2</sub>, COVs, PM 2.5 (del inglés "Particulate Matter"; se trata de finas partículas en suspensión de 2.5 micrómetros o menos) y de humedad [21].

Según el RITE (Reglamento de Instalaciones Térmicas de Edificios) [22], se distinguen cuatro niveles de calidad del aire en función del uso de los edificios. Éstas van desde IDA 1, cuando el aire tiene una calidad óptima, y se dedica a hospitales, guarderías, laboratorios, etc., hasta IDA 4, cuando la calidad del aire es baja, y es preferible no utilizarlo. Entremedias están IDA 2, con un aire de buena calidad, propio de museos, aulas u oficinas, e IDA 3, con una calidad media, como es el caso de bares, cines, gimnasios, etc.

El propio RITE recoge en unas tablas el caudal mínimo de aire exterior de ventilación en función del método al que se recurra para renovar el aire interior y conservar su IDA:

- Método indirecto de caudal de aire exterior:

Tabla 1. Tabla 1.4.2.1 del RITE Caudales de aire exterior, en dm<sup>3</sup>.

Categoría	dm <sup>3</sup> /s por persona
IDA 1	20
IDA 2	12,5
IDA 3	8
IDA 4	5

- Método directo por calidad del aire percibido:

Tabla 2. Tabla 1.4.2.2 del RITE Calidad del aire percibido, en decipols.

Categoría	dp
IDA 1	0,8
IDA 2	1,2
IDA 3	2
IDA 4	3

- Método directo por concentración de CO<sub>2</sub>:

*Tabla 3. Tabla 1.4.2.3 del RITE Concentración de CO<sub>2</sub> en los locales.*

Categoría	ppm (*)
IDA 1	350
IDA 2	500
IDA 3	800
IDA 4	1200

(\*) Concentración de CO<sub>2</sub> (en partes por millón en volumen) por encima de la concentración en el aire exterior

- Método indirecto de caudal de aire por unidad de superficie:

*Tabla 4. Tabla 1.4.2.4 del RITE Caudales de aire exterior por unidad de superficie de locales.*

Categoría	dm <sup>3</sup> /(s.m <sup>2</sup> )
IDA 1	no aplicable
IDA 2	0,83
IDA 3	0,55
IDA 4	0,28

- Método de dilución: este último método se ciñe al apartado 6.4.2.3 de la EN 13779, y a los límites fijados por las autoridades sanitarias en cuanto a la concentración del aire de impulsión y las propias emisiones del local.

Excepcionalmente. piscinas climatizadas, hospitales y clínicas no se rigen por los métodos presentados.

En España, tenemos varios documentos que regulan qué método utilizar, en función del tipo de edificio, para calcular las necesidades de ventilación. Se especifican en los siguientes párrafos.

Para edificios de viviendas, y aparcamientos y garajes de otros edificios se aplica el CTE (Código Técnico de la Edificación), y en concreto su apartado DB HS 3 Salubridad – Calidad del aire interior. Para cuantificar la calidad del aire se miden la concentración de CO<sub>2</sub> en el local, y se establece un caudal mínimo de ventilación. Cocinas, trasteros, almacenes, aparcamientos y garajes tienen, además, otras especificaciones [23], [24].

Según especifica el CTE, para cualquier otro tipo de local, ha de recurrirse al RITE, en su apartado IT 1.1.4.2 Exigencia de calidad del aire interior, con las condiciones expuestas anteriormente de IDA. En este caso, se admiten las cinco metodologías tabuladas anteriormente [22], [24].

Por todo lo expuesto en este apartado 2.1.3, y centrándonos en nuestro edificio caso de estudio, se puede concluir que el LUCIA necesita de un aire IDA 2, por ser salas de trabajo tipo oficinas, laboratorios y áreas de investigación.

#### 2.1.4 Tecnologías que reducen el consumo del tratamiento del aire de impulsión utilizando energías renovables

En sintonía con los problemas mencionados al comienzo de este TFM (emisiones de CO<sub>2</sub>, bajo rendimiento energético, aumento del consumo energético, etc.), y con las medidas europeas



presentadas en los párrafos precedentes, resulta adecuado comentar algunas de las opciones de las que disponemos a día de hoy para minimizar el impacto medioambiental de la deriva actual. Concretamente, se introducirán tecnologías pasivas de tratamiento de aire, con el que se consigue un doble beneficio: reducir el consumo energético debido al pretratamiento térmico, y utilizar energías renovables.

En este último grupo de tecnologías se encuentran los intercambiadores de calor Tierra-Aire, más conocidos por sus siglas en inglés EAHE (Earth to Air Heat Exchanger). También es posible encontrar información sobre ellos bajo otras denominaciones, tales como EAHX, pozos geotérmicos de baja potencia, pozos canadienses o pozos provenzales.

El fundamento del EAHE consiste en conducir el aire bajo tierra y aprovechar la estabilidad térmica del terreno, para conseguir un intercambio de energía que aproxime la temperatura del aire a nuestras necesidades. Si la demanda de temperatura no está completamente cubierta, como suele ocurrir en la gran mayoría de las situaciones, se puede recurrir a otros métodos complementarios, como una UTA (Unidad de Tratamiento de Aire).

Otra de las tecnologías que se asemeja a los EAHE son las bombas de calor subterráneo o GSHP (Ground Source Heat Pump). La principal diferencia reside en el fluido al que se recurre, ya que, en lugar de utilizar aire, el intercambio de calor se hace mediante fluidos con mayor calor específico (agua, anticongelantes, refrigerantes). No obstante, puesto que el edificio de la Uva que se va a estudiar cuenta con EAHE, en lugar de GSHP, profundizaremos en los primeros y no en los segundos.

Para conocer mejor los EAHE se han consultado varios documentos, principalmente artículos científicos, entre los cuales destaca la publicación *The state of art on the applications, technology integration, and latest research trends of earth-air-heat exchanger system* [25], que data de 2019. Se trata de una recopilación reciente de las tecnologías y aplicaciones de los intercambiadores Tierra- Aire (EAHE) de los últimos 40 años, así como de las nuevas líneas de innovación actuales.

Uno de los primeros aspectos a tratar, como se sugería precedentemente, es la pertinencia de este tipo de instalaciones como apoyo a otras tecnologías de tratamiento de aire que asuman la carga principal, puesto que al necesitar únicamente un elemento que fuerce al aire a pasar a través de unos conductos bajo tierra (por ejemplo un ventilador), su consumo energético es reducido (en comparación a un sistema puro que derive toda la carga térmica a una bomba de calor, una UTA, un enfriador evaporativo, etc.), con lo que se consigue, indirectamente, una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Algunos ejemplos de instalaciones híbridas, rescatados del propio artículo, se recogen en una tabla que muestra posibles combinaciones (ya existentes) del EAHE con otras tecnologías:

Tabla 5. Tabla 2 del artículo [28], que recoge distintas formas híbridas de utilización de un EAHE, con explicación de las abreviaturas y su traducción.

N	SISTEMA HÍBRIDO	EXPLICACIÓN DE LAS ABREVIATURAS	TRADUCCIÓN AL ESPAÑOL
1	EAHE + ASHP	ASHP: air source heat pump	Bomba de calor
2	EAHE + AHU	AHU: air handling unit	Unidad de Tratamiento de Aire (UTA)
3	EAHE + AC	AC: air conditioning system	Sistema de aire acondicionado
4	EAHE + SPV + AC	SPV: solar photovoltaic	Solar fotovoltaico
5	EAHE + PCM	PCM: phase change material	Materiales con cambio de fase
6	EAHE + WCHE	WCHE: water cooled heat exchanger	Intercambiador de calor refrigerado por agua
7	EAHE + EC	EC: evaporative cooler	Enfriador evaporativo
8	EAHE + DW + PDEC	DW: desiccant wheel, PDEC: passive downdraft evaporating cooling	DW: rueda desecante, PDEC: enfriamiento por evaporación de corriente descendente pasiva
9	EAHE + SAH	SAH: solar air heater	Calentador de aire solar
10	EAHE + SC	SC: solar chimney	Chimenea solar
11	EAHE + Solar Collector + SC		
12	EAHE + WT + SC	WT: Wind tower	Torre de viento
13	EAHE + WT		
14	EAHE + BTM	BTM: building thermal mass	Inercia térmica del edificio

Por motivos obvios, pondremos el foco en los casos en los que se ha utilizado un EAHE en un edificio académico o de investigación, como los nuestros, en detrimento de otros usos que aparecen en el artículo (invernaderos, granjas, paneles solares, etc.).

El interés de un EAHE es muy evidente en invierno, en el que el terreno, a cierta profundidad, en la mayoría de las latitudes, se encuentra a mayor temperatura que el aire exterior, por lo que, al conducirlo subterráneamente, conseguimos calentarlo. Igualmente atractivo resulta en verano, cuando ocurre lo contrario, y conseguimos enfriar el aire exterior. Todo ello se demuestra en el artículo *Earth-to-air heat exchangers for Italian climates* [26], en el que además se puntualiza que estos intercambiadores, resultan más eficientes cuanto más frío es el clima, tal y como se observó haciendo un seguimiento a tres intercambiadores situados en Nápoles (Latitud: 40.8401/ 40° 50' 24" Norte), Roma (Latitud: 41.8905/ 41° 53' 26" Norte) y Milán (Latitud: 45.46427/ 45° 27' 51" Norte).

En línea con las puntualizaciones sobre la idoneidad de los intercambiadores en según qué situaciones, varias publicaciones más, referenciadas en [25], aluden a la pérdida efectividad del intercambiador en ambientes húmedos. Como ocurre en muchos ámbitos, la influencia de ciertos parámetros es más fácil de identificar cuando se evalúan fenómenos o situaciones extremas; en este caso, se realizaron seguimientos de la eficacia de varios intercambiadores en una zona de monzones, y se observó que en los periodos especialmente húmedos los EAHE eran muy poco útiles.

En cuanto a los edificios de usos similares al LUCIA que se mencionan en el artículo, se comenzará por el caso de un instituto en Japón [27], sobre el cual se modeló y probó un EAHE de forma satisfactoria. El modelo que idearon propone, para un rango de datos determinado, un método de diseño para elegir la configuración de tubos adecuada del intercambiador, en función del número de tubos, el espacio entre ellos, su longitud, la velocidad del aire de impulsión, y la composición del terreno. A partir de dicho modelo se puede predecir un ratio

de transferencia de calor en función de la influencia térmica de los tubos adyacentes. La expresión de dicho ratio responde a:

$$R_{Nt} = \frac{Q_{Nt}}{Q_{1t} \cdot N} \cdot 100 (\%)$$

Donde  $R_{Nt}$  es el ratio anual de calor intercambiado, y  $Q_{Nt}$  y  $Q_{1t}$  son tasas de transferencia de calor anuales para  $N$  tubos y un solo tubo, respetivamente, en las mismas condiciones de diseño (excepto por el número de tubos). " $Q_{1t} \cdot N$ " es, en definitiva, la tasa de transferencia de calor cuando no hay interferencia térmica entre los tubos. También se desarrollan los modelos para intercambiadores cuyo diseño unitario comprende dos tubos, y tres o más tubos.

Un último de caso de un edificio de oficinas de baja energía concluye que, en su caso, era más eficiente utilizar la ventilación nocturna que el EAHE *Passive cooling in a low-energy office building*.

Dejando a un lado el cuerpo del artículo, en su parte final, presenta algunas conclusiones muy interesantes, que completan lo ya aportado. Empezando por el diseño de intercambiadores EAHE, es importante valorar el intercambio de cargas latentes que se producirá (debido al clima de la zona), pues afectará al potencial térmico intercambiable entre el aire y el terreno. Por otro lado, abre una ventana a nuevas posibilidades de diseño, reemplazando la disposición horizontal, comúnmente extendida, por la vertical, que cuenta con las ganancias de espacio y efectividad, aunque puede aumentar el coste de la obra.

Otra de las revelaciones halladas trata sobre los momentos de mayor rendimiento del intercambiador, que se dan en las siguientes condiciones: uno, refrescando en las horas centrales del día en verano (frente a calentar en las horas más frías de las noches de invierno), y dos, bajo un funcionamiento intermitente (ante uno sin descanso).

Y finalmente, las últimas conclusiones se adentran a hablar del propio terreno que rodea las tuberías del intercambiador. Se nombran tres aspectos de influencia: la composición del terreno, su humedad, y su nivel de compactación. Del primer parámetro se busca una cierta composición de limos, mangas y arcillas para lograr unas buenas propiedades térmicas. Del segundo, se ha probado que un terreno humedecido aumenta la eficacia del intercambiador hasta un 40% (otro estudio ponía el foco en el COP del EAHE, que era de 5.07 para un suelo seco, inferior a 6.41 resultado de humedecer el terreno artificialmente); un comportamiento análogo ocurre con un terreno compacto (se han obtenido ganancias de eficacia del 50%).

Sorprendentes son también las conjeturas extraídas de un estudio que probó a sumergir las tuberías del EAHE dentro de una balsa de agua a 1.3 m bajo el suelo, y consiguió el efecto de haberlas enterrado directamente en el suelo a 2 m de profundidad. Esta investigación resulta interesante para casos en los que haya limitaciones de espacio naturales (profundidad susceptible de ser excavada, como, por ejemplo: un suelo pedregoso) o artificiales (ejemplo: incorporar un EAHE a una construcción ya existente). Esta técnica resultó, además, más barata que la convencional, pues se ahorró el coste del nuevo terreno de relleno (que como se ha explicado antes, debe poseer las propiedades adecuadas) para la diferencia de profundidad (en este caso  $2-1.3=0.7\text{m}$ ).

El mismo artículo [25] también recoge las investigaciones más recientes; en general, se trata de modelos de intercambiadores, métodos de diseño para EAHE o simulaciones que, en algunos casos, han sido llevados a la práctica.

Una de estas investigaciones, [28], hace una doble aportación; por un lado elaboró un modelo para determinar la temperatura del terreno alrededor de la tubería. Por otro lado, también crearon un modelo que permite dimensionar el espesor del radio de las tuberías en función del tiempo de operación, la difusividad térmica del terreno, el diámetro de la tubería y la temperatura del aire. Este segundo modelo fue puesto a prueba en una segunda parte de esta investigación, en la que construyeron un modelo real para contrastar los resultados teóricos. La desviación fue del 3%.

Otra de las líneas de investigación recientes [29], elaboró un modelo de elementos finitos, posteriormente validado con la aplicación práctica, que trazaba la evolución de la humedad del terreno alrededor de la tubería (con radios cada vez más amplios) a lo largo de las horas de funcionamiento. Dicho estudio puede ser muy útil para fijar una distancia mínima entre tuberías a la hora de diseñar un EAHE. Asimismo, este estudio se apoyaba en una publicación precedente [30], que afirma que la temperatura puede considerarse constante a partir de 0.15m para variaciones diarias, y a partir de 4 metros para variaciones anuales.

En la publicación *Climate-potential of earth-To-Air heat exchangers* [31], de G. Chiesa, se describe un modelo que calcula el potencial que puede tener un EAHE en función del clima y las propiedades del terreno.

En penúltimo lugar, se aborda el problema del amplio espacio que suele necesitar la instalación de un EAHE, probando distintos diseños y configuraciones. Entre las más destacadas se encuentran: uno, la ya mencionada configuración vertical en espiral, con COPs (Coefficient of Performance) ligeramente superiores (6.24 frente a 5.94 en verano, y 2.11 frente a 1.92 en invierno), que además necesita menos terreno, y facilitaba la descarga de agua condensada. Y dos, el reemplazo de la “clásica” configuración, de varios tubos cilíndricos, por un único gran conducto plano que ocupara la misma área, lo que aportó mayores ahorros de energía tanto en verano (20.41 MW h frente a 10.3 MW h), como en invierno (16.35 MW h frente a 13.5 MW h) [32].

En contra posición, *Parametric Analysis on an Earth-to-Air Heat Exchanger Employed in an Air Conditioning System* [33] recomienda, en caso de ser posible, longitudes de tubo de entre 80 y 100 m, y diámetros pequeños para aumentar la velocidad del aire y potenciar la transferencia de calor convectiva. En este estudio, aumentando la longitud del tubo y reduciendo el diámetro de 0,5 a 0,2 m, se consiguieron reducciones de la potencia consumida por los equipos principales del 60-70% en calefacción y del 40-55% en refrigeración.

## 2.2 Consumo energético asociado al Tratamiento del Aire de Ventilación

Según se ha explicado en el apartado de Calidad del Aire Interior, por normativa, existen unas necesidades mínimas de renovación del aire en las estancias. El principal actor de dicho aire de ventilación es el aire exterior, que, generalmente, no se encuentra en las condiciones higrotérmicas idóneas de impulsión a los locales, por lo que debe ser tratado higrotérmicamente. Este tratamiento lleva asociado un coste económico y energético, que contribuye a las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Con el objetivo de reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero, se recurre a fuentes renovables o residuales de energía para pretratar el aire, así como la recuperación de calor del aire de expulsión.

En el grupo de los pretratamientos se encuentran los intercambiadores Tierra-Aire, objeto de este trabajo, y cuyo funcionamiento se explicó anteriormente (introducción del apartado

Tecnologías que reducen el consumo del tratamiento del aire de impulsión utilizando energías renovables).



### 3 METODOLOGÍA

En este apartado se muestra la metodología seguida para lograr el objetivo de conocer el aprovechamiento real del intercambiador Tierra-Aire del edificio LUCIA, comenzando por la descripción del caso de estudio.

#### 3.1 Caso de estudio: edificio LUCIA

El edificio LUCIA (acrónimo de Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada), que alberga en su interior laboratorios y espacios de investigación, se construyó en 2013, siendo una de las edificaciones más destacadas de la UVa en cuanto a sostenibilidad. Se trata de un Edificio de Energía Nula, en inglés Zero Energy Buildings (ZEB), que incorpora numerosas técnicas de ahorro energético, lo que le ha valido para obtener importantes premios y certificaciones (por ejemplo, el certificado LEED platino).

Se encuentra en el Campus Miguel Delibes de la Universidad de Valladolid (Valladolid, España).

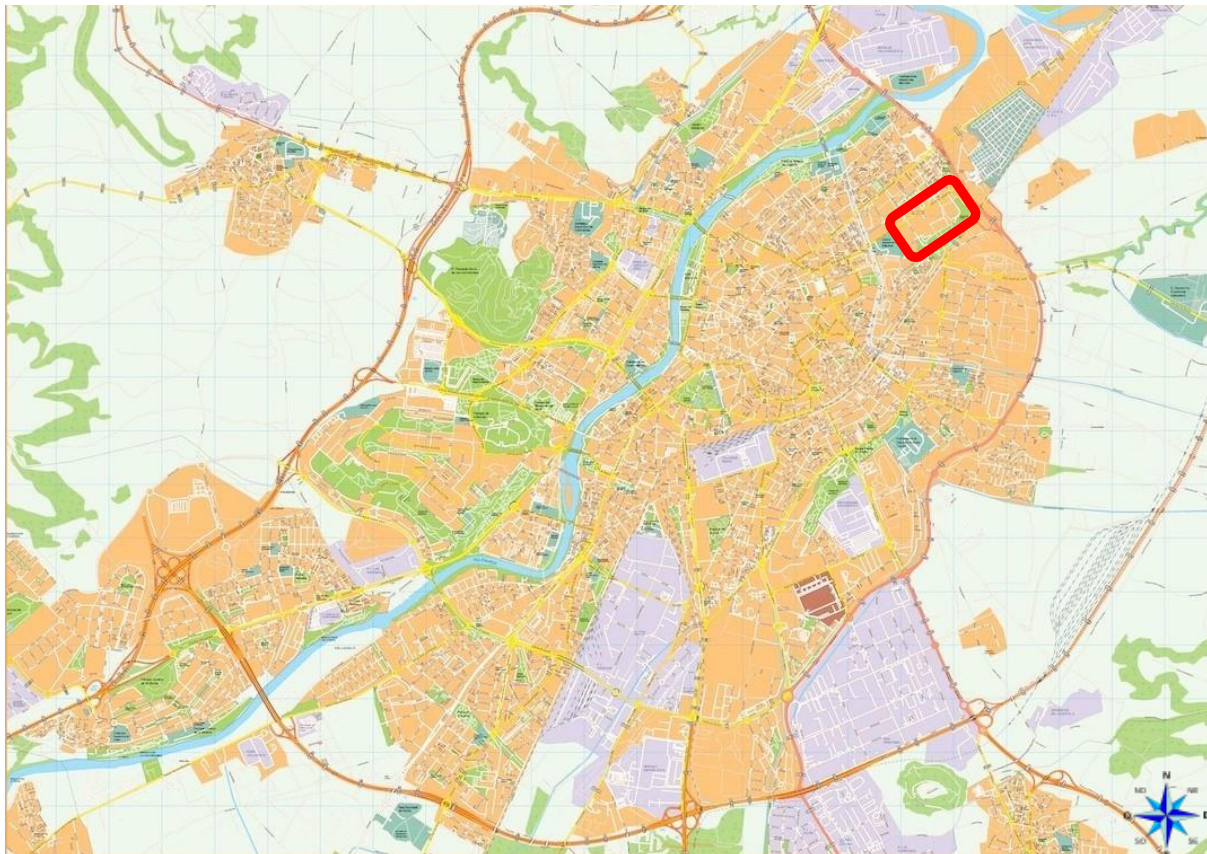


Figura 1. Localización del Campus Miguel Delibes, recuadrado en rojo, en el entorno de la ciudad de Valladolid.



Figura 2. Situación del edificio LUCIA, recuadrado en rojo, en el Campus Miguel Delibes (Valladolid).

Precisamente, una de las técnicas de ahorro energético con las que cuenta el edificio LUCIA son los pozos geotérmicos. Como se ha explicado en la introducción, la utilidad de este tipo de intercambiadores reside en hacer pasar el aire bajo tierra para aprovechar la diferencia de temperatura con el exterior, y así reducir el consumo energético de la UTA, que tratará el aire térmicamente antes de impulsarlo a las distintas estancias.



Figura 3. Vista aérea aumentada de la entrada del intercambiador del edificio LUCIA [37].

Por otro lado, el edificio LUCIA consta de un sistema SCADA, acrónimo de Supervisory Control And Data Acquisition, en español Supervisión, Control y Adquisición de Datos.

El sistema SCADA registra velocidades del aire (retorno e impulsión), parámetros a la salida del EAHE (temperatura, humedad relativa, entalpía), y porcentajes de apertura de compuertas



(compuerta “exterior-by pass”, que expulsa el aire sin pasar por el recuperador de calor; compuerta “exterior”, que regula la entrada de aire directamente desde el exterior; compuerta del EAHE, que controla la llegada de aire al recuperador de calor procedente del EAHE).

### 3.1.1 Descripción de la instalación

La instalación de climatización del edificio LUCIA está formada por un conjunto de elementos, cuyo objetivo es asegurar el confort de los espacios interiores. La siguiente figura representa un esquema simplificado:

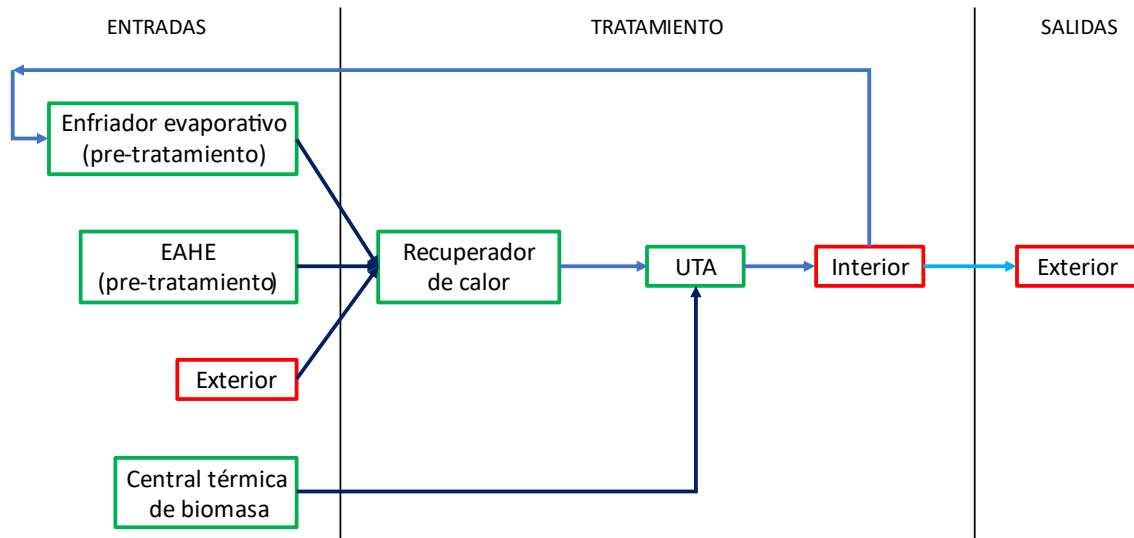


Figura 4. Esquema simplificado de la instalación de climatización del edificio LUCIA.

La instalación consta de 3 entradas de aire principales. En primer lugar, un enfriador evaporativo, adecuado para épocas con demanda de refrigeración, caracterizado por su bajo consumo energético al aprovechar el contenido energético de la corriente proveniente de los espacios interiores del edificio. Al igual que el EAHE, hace las veces de pre-tratamiento.

Otra de las entradas es el intercambiador de calor Tierra-Aire, EAHE, objeto de estudio de este proyecto, recurrente a lo largo de todo el año. El EAHE toma el aire del exterior.

En tercer lugar, en caso de que las condiciones exteriores sean propicias, es posible utilizar directamente el aire exterior.

Posteriormente, sin importar a qué entrada se ha recurrido, el aire circula a través de un recuperador de calor sensible de placas metálicas de flujo cruzado. Después continúa su paso por la Unidad de Tratamiento de Aire (UTA). Es el equipo encargado de asegurar que el aire impulsado a las estancias del edificio está en las condiciones termohigrométricas adecuadas. En situaciones en las que las condiciones exteriores sean muy distintas a las condiciones de consigna interiores, cuanto más aporten los sistemas de pre-tratamiento, menos trabajará la UTA.

Por otro lado, la planta de Biomasa es una caldera que genera agua caliente que alimenta la batería de calor de la UTA.

Finalmente, el aire es impulsado a las distintas estancias del edificio LUCIA, y de ahí al exterior (previa paso por el recuperador de calor).

### 3.2 Caracterización del intercambiador

Atendiendo a la revisión bibliográfica del segundo epígrafe de este trabajo, se han identificado ciertos parámetros necesarios para caracterizar un intercambiador de calor Tierra-Aire. A continuación, se listarán los más relevantes.

- Número de tubos.
- Longitud de los tubos.
- Diámetro del tubo.
- Material de los tubos.
- Profundidad de los tubos.
- Distancia entre tubos.
- Velocidad del aire que circula a través del intercambiador.
- Caudal que circula a través del intercambiador.
- Aportación energética del intercambiador.
- Composición del terreno.
- Zona climática.

No todos son imprescindibles, pero sí aportan información útil.

Particularizando en el caso del edificio LUCIA, la siguiente figura muestra la sección transversal del EAHE, y la siguiente tabla expone los parámetros característicos.

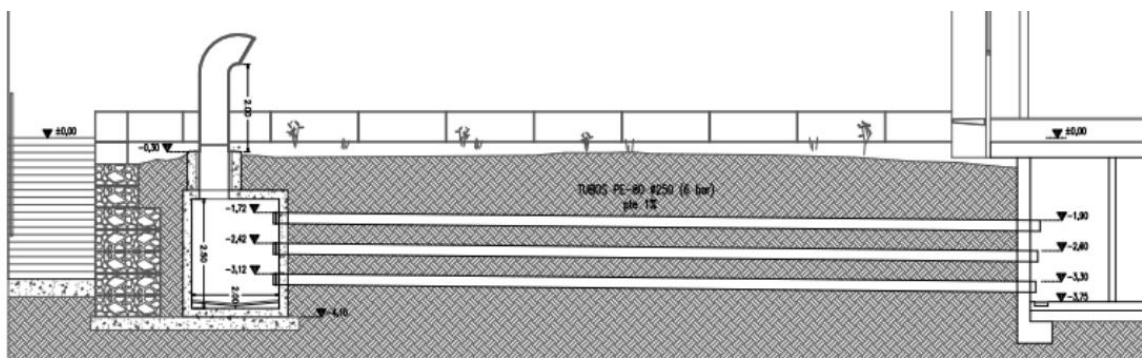


Figura 5. Corte vertical del intercambiador del edificio LUCIA (Alzado de la Figura 6) [34].

Tabla 6. Características del intercambiador del edificio LUCIA [34].

PARÁMETRO	EAHE del edificio LUCIA
Nº de entradas exteriores	3
Nº tubos	52
Longitud	18 m
Superficie ocupada	18m x 16,7m
Situación	Exterior del edificio
Tipo de tubos	PE80 -250mm
Profundidad	Fila 1: 2,02 m Fila 2: 2,72 m Fila 3: 3,42 m
Aportación energética	25.000 kWh térmicos
Otros datos de interés	
• <b>Inclinación de los tubos</b>	1% hacia el edificio
• <b>¿Terreno cubierto?</b>	Sí, por una pradera silvestre de herbáceas autóctonas para un clima continental básico.
• <b>¿Terreno regado?</b>	No
• <b>¿Terreno compactado?</b>	Sí

Respecto al terreno donde se encuentran posicionados los tubos del EAHX, se trata de arcilla con un calor específico de 0,8 kJ/kg°C, densidad de 2700 kg/m<sup>3</sup> y una conductividad térmica de 2,9 W/m°C [35].

### 3.3 Adquisición de datos

Para conocer el aprovechamiento real del pre-tratamiento térmico del aire de ventilación aportado por el EAHE en este edificio, se ha realizado una campaña de mediciones. Por un lado, se han recuperado el porcentaje y los horarios de apertura de las compuertas del intercambiador a través de las mediciones del sistema SCADA, y, por otro lado, se han colocado sondas de medición de temperatura a la entrada y salida del intercambiador. La siguiente figura muestra la localización de las sondas.

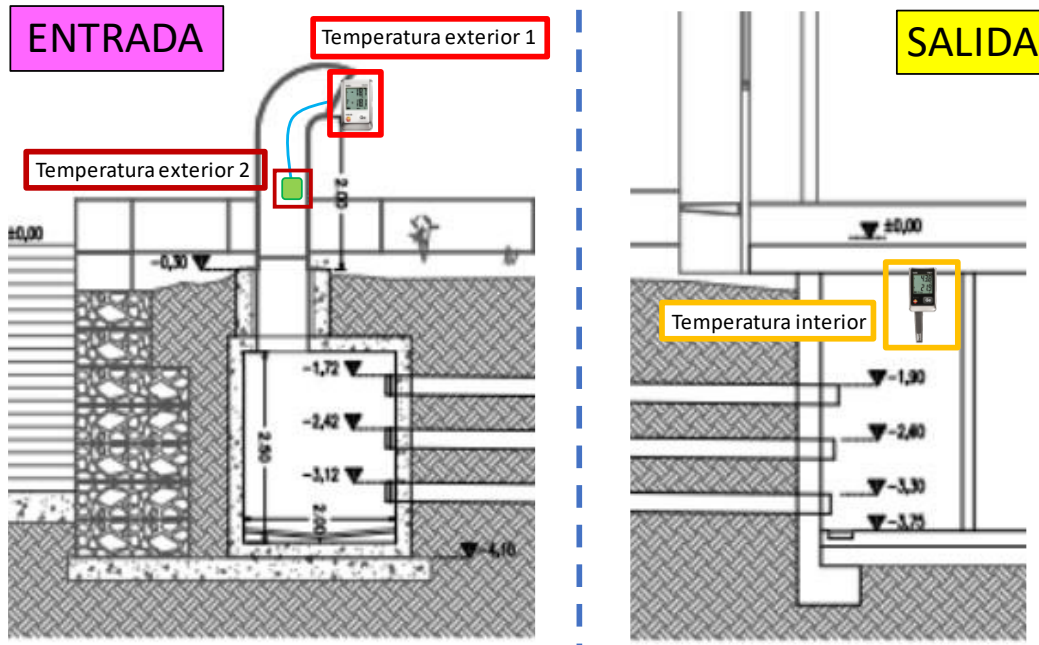


Figura 6. Corte del alzado del intercambiador del edificio LUCIA, mostrando la localización de las sondas a la entrada y la salida.

Aunque SCADA proporcionara una gran cantidad de datos, para calcular la efectividad del intercambiador, aún se necesitaba la temperatura a la entrada, de forma que se pudiera medir la energía intercambiada a lo largo de los tubos del intercambiador. Esa es la razón que animó a colocar sondas tanto a la entrada, como a la salida del EAHE (ambas sondas fueron calibradas en el laboratorio, por lo que resultaban más fiables que la medida de “temperatura a la salida del EAHE” proporcionada por SCADA.

En lo relativo a la instalación de las sondas, las situadas a la entrada de los intercambiadores fueron sujetas con un candado a la rejilla metálica anti-pájaros.

Además de la propia sonda fijada a la rejilla, estas sondas contaban con un sensor interno y una sonda externa conectada mediante un cable de aproximadamente, un metro de largo. Dicha sonda externa se hizo pasar a través de la rejilla, posándola en el interior del tubo, de manera que fuera posible contrastar las medidas de los datos de temperatura de entrada y evaluar su fiabilidad.



*Figura 7. Sonda de temperatura colocada a la entrada del intercambiador del edificio LUCIA.*

Adicionalmente, como se puede observar en las imágenes, se colocó papel de plata en torno a la sonda, puesto que se encuentra expuesta parcialmente a la radiación solar, con el objeto de evitar que el sol adultere los registros de temperatura.

A la salida del intercambiador, las sondas se fijaron con bridas, de manera similar a cómo se hizo en la entrada:



*Figura 8. Sonda de temperatura colocada a la salida del intercambiador del edificio LUCIA [35].*

### 3.3.1 Sondas utilizadas

Las sondas utilizadas, así como sus fichas técnicas son:

- El modelo *testo 175 T2*, colocado a la entrada del intercambiador.

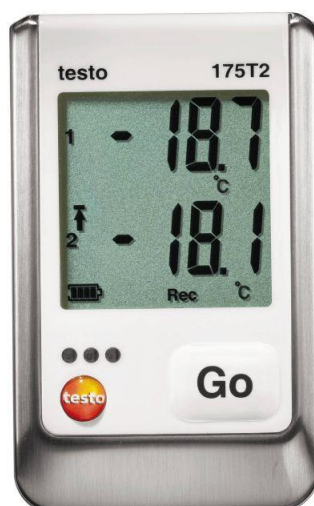


Figura 9. Sonda testo 175 T2, colocada a la entrada del intercambiador.

Consta de dos canales: un sensor interno y otro para medir a distancia (1,5 m aproximadamente). Algunos de sus datos técnicos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 7. Características metrológicas principales de la sonda testo 175T2, colocada a la entrada de los intercambiadores [35].

Datos técnicos generales	
<b>Peso</b>	160 g
<b>Medidas</b>	89 x 53 x 27 mm
<b>Temperatura de</b>	-35 hasta +55 °C
<b>Carcasa</b>	Plástico
<b>Clase de protección</b>	IP65
<b>Canales</b>	1 externo; 1 interno
<b>Color del producto</b>	blanco
<b>Norma</b>	Directriz UE 2014/30/EU; 2011/65/EU; DIN EN 12830
<b>Intervalo de medición</b>	10 seg - 24 h
<b>Tipo de batería</b>	3 pilas AIMn o Energizer tipo AAA
<b>Autonomía</b>	3 años (15' intervalo de medición a +25 °C)

Datos técnicos generales	
<b>Interfaces</b>	mini usb, ranura para tarjeta SD
<b>Memoria</b>	1.000.000 valor medido
<b>Temperatura de</b>	-35 hasta +55 °C
NTC	
<b>Rango</b>	-35 hasta +55 °C interno
<b>Exactitud</b>	interno: $\pm 0,5$ °C (-35 hasta +55 °C) $\pm 1$ Dígito
<b>Resolución</b>	0,1 °C

Para más detalles sobre la sonda, se puede recurrir a la página web o al catálogo de la marca [36].

- El modelo *testo 175 H1*, colocada a la salida del intercambiador.



Figura 10. Sonda testo 175 H1, colocada a la salida del intercambiador.

Registra temperatura seca y humedad relativa. Un resumen de sus características se recoge en la siguiente tabla:

Tabla 8. Características metrológicas principales de la sonda testo 175H1, colocada a la entrada de los intercambiadores [36].

Datos técnicos generales	
<b>Peso</b>	130 g
<b>Medidas</b>	149 x 53 x 27 mm
<b>Temperatura de</b>	-20 hasta +55 °C
<b>Carcasa</b>	Plástico
<b>Clase de protección</b>	IP54
<b>Canales</b>	2 externo
<b>Color del producto</b>	Neuro
<b>Vida útil del sensor</b>	Long-term drift of the sensor <1% RH / year (ambient
<b>Norma</b>	Directriz UE 2014/30/EU; 2011/65/EU
<b>Intervalo de</b>	10 seg - 24 h
<b>Tipo de batería</b>	3 pilas AlMn o Energizer tipo AAA
<b>Autonomía</b>	3 años a 15 min. intervalo med.. +25 °C
<b>Interfaces</b>	mini usb. ranura para tarjeta SD
<b>Memoria</b>	1.000.000 valor medido
<b>Temperatura de</b>	-20 hasta +55 °C
NTC	
<b>Rango</b>	-20 hasta +55 °C
<b>Exactitud</b>	±0,4 °C (-20 hasta +55 °C) ±1 Dígito



<b>NTC</b>	
<b>Resolución</b>	0,1 °C
<b>Humedad capacitivo</b>	
<b>Rango</b>	0 hasta 100 %HR*
<b>Exactitud</b>	±2 %HR (2 hasta 98 %HR) at +25 °C
<b>Resolución</b>	0,1 %HR

\* Inadecuado para atmósferas con condensación.

<b>Punto de rocío (calculado)</b>	
<b>Rango</b>	-40 hasta +50 °Ctd
<b>Exactitud</b>	+0.03 %HR/K ±1 Daito

Del mismo modo que para la sonda anterior, en su sitio web y en su catálogo [37] se pueden consultar más detalles.

La calibración de todas las sondas utilizadas fue realizada previamente a su colocación, en el Laboratorio de Calor y Frío (de la Escuela de Ingenierías Industriales de la UVA); los resultados obtenidos son los reflejados a través de la siguiente tabla:

Tabla 9. Calibración de las sondas utilizadas para registrar temperaturas durante este Trabajo de Fin de Máster.

<b>Edificio</b>	<b>LUCIA</b>		
<b>Localización</b>	<b>Entrada</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>
<b>Modelo Testo</b>	175T2	175T2	175H1
<b>Sonda</b>	618 externa	618 interna	S6
<b>Pendiente</b>	1,007283766	1,033525478	0,992353681
<b>Ord Orig</b>	-0,100919917	-0,286100519	0,279792052
<b>Regresión</b>	0,999997179	0,99922084	0,999758828
<b>Registro SN</b>	SN 40126618	SN 40126618	SN 40304572
<b>EXT. EQUIPO</b>	SN 40126618	SN 40126618	SN 40304572

### 3.3.2 Software

Todas ellas fueron programadas, con el software “testo Comfort Software Basic 5.0”, y colocadas el 04/12/2019, y comenzaron a registrar mediciones apenas unas horas después en intervalos de 10 minutos.

Los datos de las sondas y del sistema SCADA fueron tratados con el programa Excel. Se eligió este software de Microsoft debido a que el formato de los datos descargados (de las sondas y

de SCADA) era “.xsl”, lo que, apoyado por la experiencia previa del alumno con este programa, inclinó la balanza para tomar la decisión de tratar los datos con dicha herramienta.

A la hora de explotar los datos, el primer paso siempre fue discriminar las columnas que tenían valor para este proyecto de las que no, con el fin de conservarlas o eliminarlas/ocultarlas. Posteriormente, se descomponía el grueso de los datos en meses. Hay que tener en cuenta que el fichero bruto, por defecto, traía todos los datos en una sola hoja de Excel, acumulando hasta 30000 filas.

En el caso de registros de las sondas, se procedió a realizar el cruce de la temperatura a la entrada y a la salida del intercambiador para una misma fecha y hora concretas, para poder relacionarlas; por ejemplo, se forzó la coincidencia de la temperatura a la entrada y a la salida para el 02/03/2020 a las 10:10:00. En siguiente lugar, se definieron las operaciones que se debían realizar con esos datos para calcular ciertos resultados, y se programaron las columnas contiguas para llevar a cabo esas operaciones, que más adelante sentarían las bases de la extracción de conclusiones (por ejemplo, con los promedios mensuales, y las comparaciones entre meses).

La apertura de las compuertas del EAHE, rescatada del SCADA, sin embargo, tuvo otro método de explotación sucesivo a la separación por meses. En este caso, se observó día a día la hora exacta en la que las compuertas se abrían y cerraban, dejando constancia de las posibles interrupciones, y del porcentaje de apertura en cada caso. Más adelante se analizó qué duración había tenido el periodo de apertura de las compuertas, qué parte de ese tiempo había sido con una apertura del 100%, y qué duración había tenido el periodo de apertura de las compuertas en el horario de apertura del centro (8 am – 20 pm). Finalmente, una última hoja recogía la comparación de algunos parámetros promediados de cada mes, lo que facilitaba la comparación.

En último lugar, se efectuó el cruce entre los datos de SCADA y las mediciones de las sondas. Tras la distinción por meses (un mes, una hoja de Excel), tuvo lugar una separación por días. Además de las columnas rescatadas de los ficheros de SCADA y las sondas, se programaron nuevas columnas con el objetivo de calcular la energía recuperada por el intercambiador (volumen específico, humedad específica, etc.).

### 3.4 Campaña de medición

La campaña de medición comenzó a principios de diciembre de 2019. La periodicidad entre muestras, de 10 minutos, se eligió en base a la velocidad de variación de la temperatura ambiente y del terreno, de forma que las medidas registradas representaran una muestra fidedigna de la evolución real de las mismas durante los meses de monitorización

Las sondas estuvieron operativas desde su colocación, y hasta el final de la campaña de medición, el 07/07/2020, acumulando un total de 7 meses.

En el caso del SCADA, realiza mediciones ininterrumpidamente; estas mediciones se registran, y al cabo de cierto tiempo se superponen con nuevos registros más actualizados.

Por desgracia, en plena campaña de medición llegó la crisis sanitaria causada por la COVID-19, que implicó la declaración del estado de alarma el 14 de marzo de 2020. Éste arrastró consigo

medidas muy restrictivas, que limitaban la circulación a actividades de primera necesidad, dentro de las cuales no se encuentra la labor desarrollada en el edificio LUCIA, por lo que este permaneció desocupado. Los datos correspondientes a este periodo de inactividad no se han tenido en cuenta, ya que no representan las condiciones normales de utilización. Del mismo modo, tampoco se han tenido en cuenta los periodos vacacionales amplios, como las Navidades o el cierre del centro en la primera quincena de agosto.

Este contratiempo acortó la campaña de medición; no obstante, con el ánimo de extenderla en la medida de lo posible, se recurrió a datos correspondientes a otras campañas de medición asociadas a otros trabajos. Del sistema SCADA se pudo recuperar información desde julio de 2019, sin embargo, en el caso de las sondas, sólo fue posible recuperar el mes de julio de 2019. Por tanto, este trabajo se ha centrado en explotar los datos correspondientes a julio (2019), diciembre (2019), enero, febrero y marzo (2020).

Finalmente, a modo de síntesis, las siguientes tablas recogen los parámetros medidos y calculados con los que se han elaborado el apartado Resultados:

*Tabla 10. Resumen de los parámetros medidos.*

<b>Parámetro medido</b>	<b>Dónde</b>	<b>Fuente</b>	<b>Frecuencia</b>
<b>T ext 1</b>	Entrada EAHE	Sonda testo 175 T2	10 minutos
<b>T ext 2</b>	Entrada EAHE	Sonda testo 175 T2	10 minutos
<b>T int</b>	Salida EAHE	Sonda testo 175 H1	10 minutos
<b>HR</b>	Salida EAHE	Sonda testo 175 H1	10 minutos
<b>H inicio X</b>	Salida EAHE	SCADA	10 minutos
<b>H fin X</b>	Salida EAHE	SCADA	10 minutos
<b>% (Periodo X)</b>	Salida EAHE	SCADA	10 minutos
<b>Q</b>	Salida EAHE	Balómetro	-

Donde:

- T ext 1: temperatura a la entrada del intercambiador medida por el canal 1 de la sonda Testo 175 T2.
- T ext 2: temperatura a la entrada del intercambiador medida por el canal 2 de la sonda Testo 175 T2.
- T int: temperatura a la salida del intercambiador medida la sonda Testo 175 H1.
- HR: humedad relativa medida la sonda Testo 175 H1.
- H inicio X: hora de inicio de un periodo de aprovechamiento del EAHE (X = 1, 2 o 3).
- H fin X: hora de fin de un periodo de aprovechamiento del EAHE (X = 1, 2 o 3).
- % (Periodo X): porcentaje de apertura de las compuertas del EAHE.
- Q: caudal circulando a través del EAHE.

Tabla 11. Resumen de los parámetros calculados.

Parámetro calculado	Función de
$\Delta$ (Text 1 - Text 2)	Text 1, Text 2
$\Delta$ (Text 1 - Tint)	Text 1, Tint
Total: Duración	H inicio X, H fin X
Total: % uso	H inicio X, H fin X
Al 100%: H100%	H inicio X, H fin X
Al 100%: %H al 100%	H inicio X, H fin X
Franja 8-20: H 8-20	H inicio X, H fin X
Franja 8-20: % 8-20	H inicio X, H fin X
T + 273	T ext 1
V_esp	HR, T ext 1
x	HR, T ext 1
C p ah	HR, T ext 1
Pot	Q, $\Delta$ (Text 1 - Tint), C p ah, V_esp
Energía	Pot, t

Donde:

- $\Delta$  (Text 1 - Text 2): la diferencia entre los parámetros medidos "T ext 1" y "T ext 2":
- $\Delta$  (Text 1 – T int): la diferencia entre los parámetros medidos "T ext 1" y "T int".
- Total: Duración: duración total del funcionamiento del EAHE en un día.
- Total: % uso: duración total del funcionamiento del intercambiador en un día expresado en porcentaje frente a las 12 horas diarias de apertura del edificio LUCIA.
- Al 100%: H100%: horas de funcionamiento del EAHE al 100% de un día.
- Al 100%: %H al 100%: duración de funcionamiento del EAHE al 100% de un día expresado en porcentaje frente a las 12 horas diarias de apertura del edificio LUCIA.
- Franja 8-20: H 8-20: horas de funcionamiento del EAHE en la franja 8-20h de un día.
- Franja 8-20: % 8-20: duración de funcionamiento del EAHE en la franja 8-20h de un día expresado en porcentaje frente a las 12 horas diarias de apertura del edificio LUCIA.
- T + 273: operación para pasar T ext 1 a grados Kelvin.
- V\_esp: volumen específico.
- X: humedad específica.
- C p ah: calor específico del aire húmedo a presión constante.

- Pot: potencia calorífica generada por el EAHE.
- Energía: energía intercambiada con el EAHE.

No obstante, todos estos parámetros se explican con mayor detalle en el siguiente epígrafe.



## 4 RESULTADOS

El presente apartado refleja los resultados obtenidos a partir de la obtención de datos sobre el comportamiento y uso real del EAHE del edificio LUCIA, así como algunas de las ideas que se pueden extraer a partir de los resultados.

### 4.1 Mediciones de las sondas

Recordando lo expuesto anteriormente, las sondas tomaban datos cada 10 minutos, luego si un día se compone de 1440 minutos, se obtienen 144 registros por día. Extrapolando estas cantidades a un mes, daría como resultado unas 4000-4500 mediciones. Representar las tablas de Excel al completo ocuparía demasiado espacio, por lo que se mostrará tan solo una pequeña muestra:

Tabla 12. Ejemplo de tabla utilizada para el tratamiento de los datos obtenidos de las sondas.

N	Día	Hora	T ext 1	T ext 2	$\Delta$ (Text 1 - Text 2)	T int	$\Delta$ (Text 1 - Tint)
1	01/02/2020	0:00:00	10,80	10,90	-0,10	11,9	1,10
2	01/02/2020	0:10:00	10,80	10,90	-0,10	11,9	1,10
3	01/02/2020	0:20:00	10,80	10,90	-0,10	11,9	1,10
4	01/02/2020	0:30:00	10,90	10,80	0,10	11,9	1,00
5	01/02/2020	0:40:00	10,90	10,90	0,00	11,8	0,90
6	01/02/2020	0:50:00	10,90	10,90	0,00	11,8	0,90
7	01/02/2020	1:00:00	10,90	10,90	0,00	11,8	0,90

Esta tabla es el resultado de la fusión de los datos de las sondas colocadas a la entrada y a la salida del EAHE. Su contenido es el siguiente:

- N: se trata de un contador de registros.
- Día: muestra el día del registro.
- Hora: representa la hora del registro.
- T ext 1 [°C]: recoge la medición del canal 1 de la sonda testo 175T2, a la entrada del intercambiador.
- T ext 2 [°C]: representa la medición del canal 2 de la sonda testo 175T2, que se introdujo por el tubo de entrada del intercambiador.
- $\Delta$  (Text 1 - Text 2) [°C]: la diferencia entre las columnas "T ext 1" y "T ext 2":

$$\Delta T_{ext 2}^{ext 1} = T_{ext 1} - T_{ext 2}$$

- T int [°C]: medición de la sonda testo 175H1, colocada a la salida del intercambiador.
- $\Delta$  (Text 1 - T int): diferencia entre los valores de las columnas con el mismo nombre, que representan la temperatura a la entrada y salida del intercambiador:

$$\Delta T_{ext 1}^{int} = T_{int} - T_{ext 1}$$

El objeto de la sexta columna,  $\Delta$  (Text 1 - Text 2), era evaluar la fiabilidad de los datos de temperatura a la entrada. La siguiente tabla muestra la media mensual de este valor, acompañada de una columna en el extremo derecho que recoge la media de los 7 meses anteriores.

Tabla 13. Valores promedio de la diferencia de temperaturas  $\Delta$  (Text 1 - Text 2) de cada mes.

	dic-19	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20	may-20	jun-20	promedio
<b>promedio</b>	-0,19	-0,24	-0,41	-0,50	-0,41	-0,65	-0,70	-0,44

Como se puede observar, en ninguno de los casos supera el grado de diferencia; de hecho, la media se encuentra por debajo del medio grado de diferencia, lo que invita a confiar en estos datos.

Posteriormente se ha procedido a analizar, de manera análoga, los valores de la columna  $\Delta$  (Text 1 - T int). El resultado se muestra a continuación:

Tabla 14. Valores promedio, máximo de calentamiento y máximo de enfriamiento de la diferencia de temperaturas  $\Delta$  (Text 1 - T int) de cada mes.

	dic-19	ene-20	feb-20	mar-20	abr-20	may-20	jun-20
<b>promedio</b>	6,05	5,85	2,44	3,40	1,30	-0,35	0,53
<b>Max calentamiento</b>	14,57	15,03	13,56	13,30	11,21	9,75	10,45
<b>Max enfriamiento</b>	-3,24	-3,87	-9,26	-9,95	-8,97	-12,24	-11,74

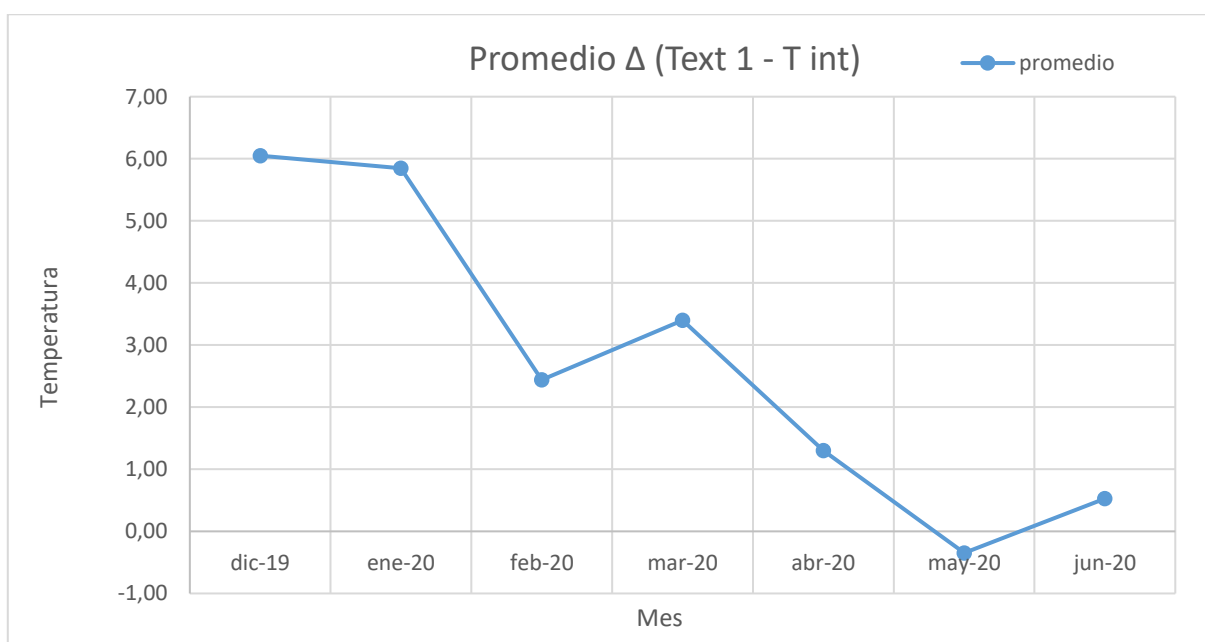


Figura 11. Evolución de los valores promedio de la diferencia de temperaturas  $\Delta$  (Text 1 - T int) de cada mes.



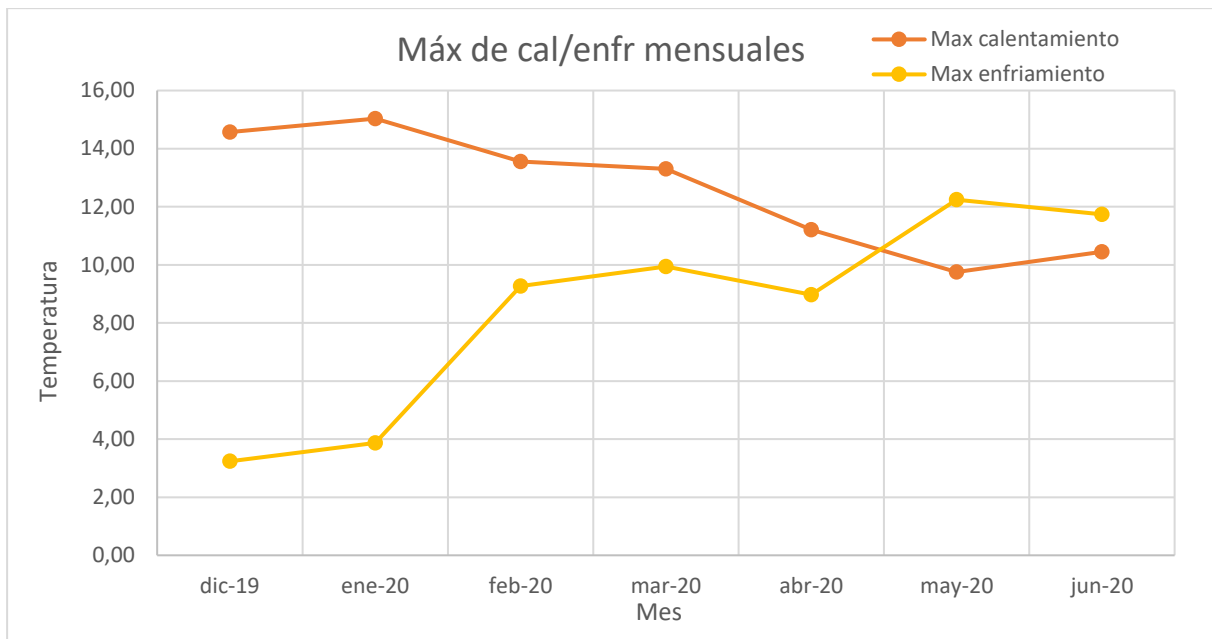


Figura 12. Evolución de los valores máximos de calentamiento y enfriamiento de cada mes.

Las filas “Max calentamiento/enfriamiento” representan los mayores saltos térmicos de cada mes. En la representación gráfica la fila “Max enfriamiento” se muestra en valor absoluto.

Resulta destacable que, durante los meses de diciembre y enero, el promedio del salto térmico es superior a los 5 puntos, con valores máximos de calentamiento de 14-15 grados. Esto implica que, durante esos meses, la UTA ha reducido la diferencia de temperatura que debe salvar antes de impulsar el aire a las estancias, de media, en al menos 5 grados. Asimismo, ha habido ocasiones, en las que la ayuda proporcionada por el intercambiador ha llegado a evitar a la UTA el consumo de la energía necesaria para calentar una corriente de aire 15 grados.

Igualmente ocurre en épocas más cálidas con el sistema de refrigeración, al que se le consigue ahorrar consumir energía por valor de enfriar una corriente de aire 12 grados.

Por otro lado, también se ha graficado la evolución mensual de los valores que toma la columna  $\Delta$  (Text 1 – T int). A continuación, un ejemplo del mes de febrero:

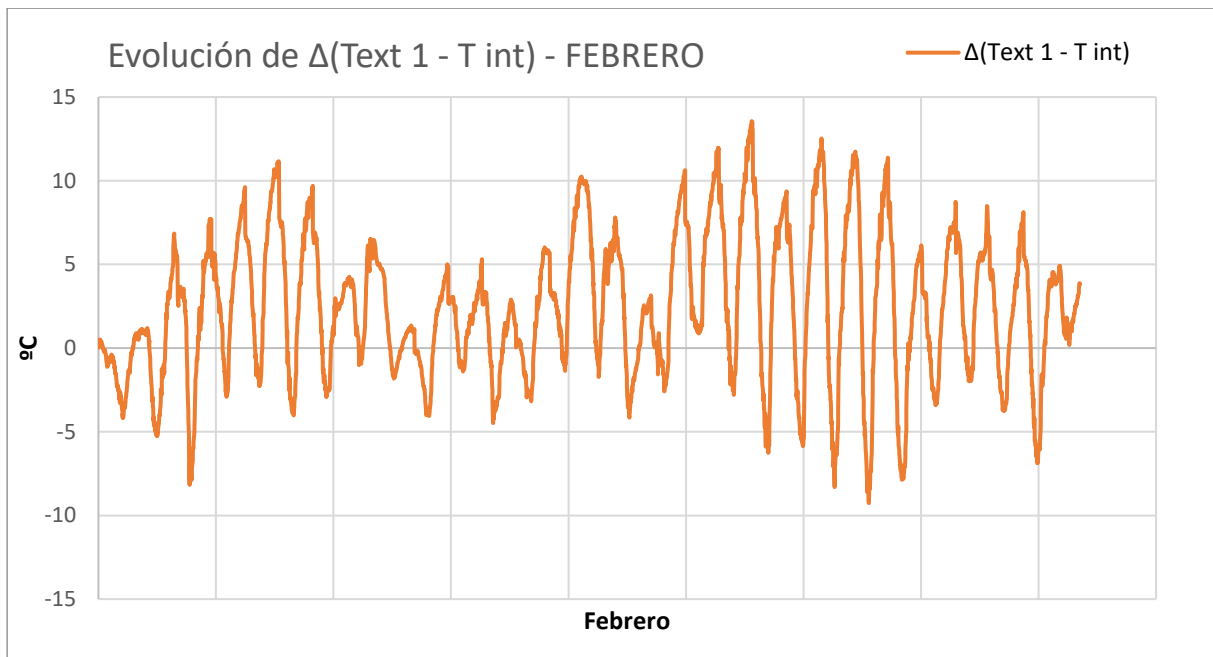


Figura 13. Ejemplo de la evolución de los valores de la diferencia de temperaturas  $\Delta(\text{Text 1} - T_{\text{int}})$  del mes de febrero.

Como se ve, el funcionamiento asciende y desciende cíclicamente; cada uno de los ciclos representa un día. Los picos representan los valores máximos (y mínimos) de la diferencia de temperaturas registrada entre la entrada y la salida del EAHE. Por ejemplo, el 20/02/20 tiene la siguiente forma:

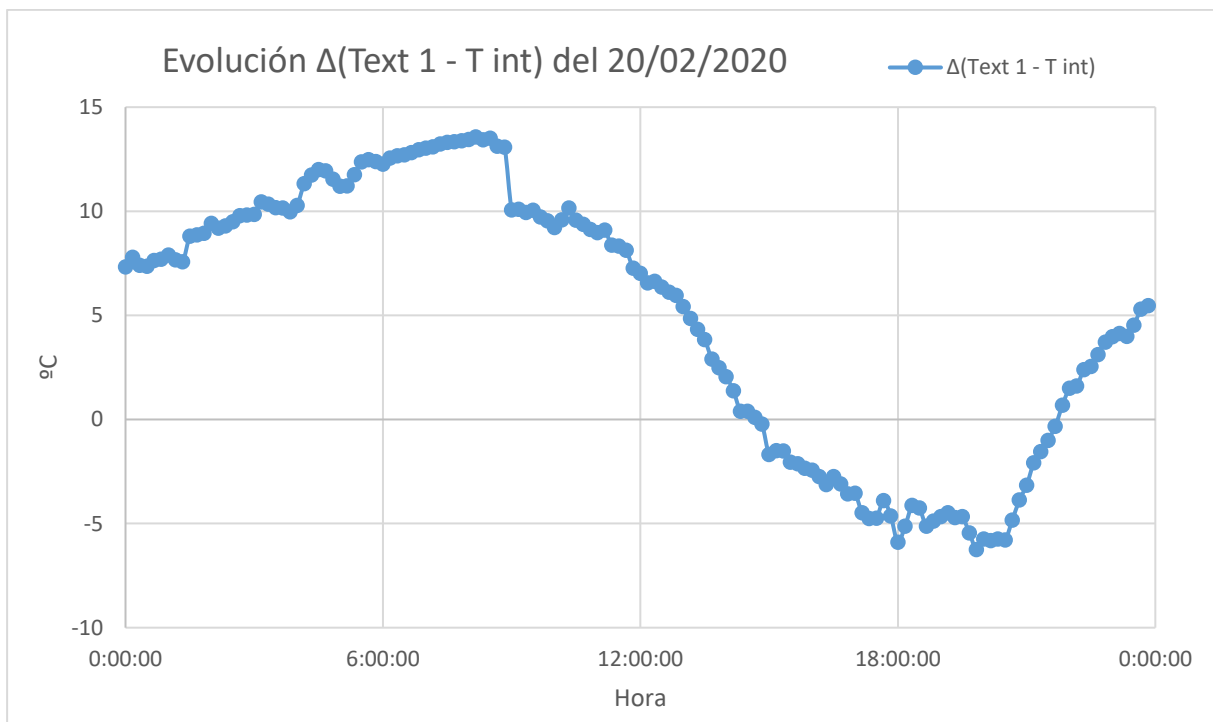


Figura 14. Ejemplo de la evolución de los valores de la diferencia de temperaturas  $\Delta(\text{Text 1} - T_{\text{int}})$  del día 20/02/2020.

Claramente se diferencia un máximo entorno a las 8:30 am, mientras que los valores mínimos llegan entre las 18-20 pm.

Este patrón se repite a lo largo de los meses estudiados, de forma que los valores máximos de  $\Delta$  (Text 1 – T int) se dan, por lo general, en la franja 6-10 am, y los valores mínimos en el intervalo 17:30-19:30 pm. Este comportamiento puede resultar útil para el edificio, ya que entrando en funcionamiento el EAHE antes de la apertura del centro se pueden aprovechar algunas de las horas más rentables para mantener al edificio en las condiciones de no ocupación fijadas en la consigna, sin recurrir a otras fuentes de energía más costosas o contaminantes.

#### 4.2 Mediciones de SCADA: apertura de las compuertas

Rememorando lo explicado en el apartado 3, las mediciones de SCADA que se pudieron recuperar abarcan desde julio de 2019 a marzo de 2020. De los datos que proporciona este sistema se han retenido los porcentajes de apertura de las compuertas del intercambiador, que indica si está activo o inactivo. Al igual que en el caso de las sondas, las mediciones se realizan cada 10 minutos.

El motivo de la apertura o cierre de las compuertas, que es automático, responde a la conservación de las condiciones de consigna [39]:

Tabla 15. Consigna de condiciones interiores a mantener según las cuales se abren/cierran las compuertas del EAHE.

Edificio	Calefacción	Climatización
Ocupado	21 °C	26 °C
Sin ocupación	18 °C	29 °C

A partir de los datos recopilados se ha creado una tabla como la Tabla 14. La tabla 14 tiene 7 columnas principales, con subgrupos internos que se explican a continuación separando:

- DÍAS: recoge información sobre los días del mes susceptibles de tener el intercambiador en activo (laborables).
  - N: contador de días laborables.
  - Día: fecha del registro analizado.
  - (en blanco): día de la semana (lunes, martes, miércoles, etc.).
- Periodo 1: existen 3 columnas llamadas “Periodo 1/2/3”, utilizadas cuando el funcionamiento del intercambiador ha sido fraccionado en más de un periodo. En caso contrario, se recoge el inicio en el bloque Periodo 1, y el final y el porcentaje de apertura de las compuertas en el bloque Periodo 3.
  - H inicio 1: hora de inicio del Periodo 1, o del periodo único en caso de funcionamiento ininterrumpido.
  - H fin 1: hora de finalización del Periodo 1 en caso de haber más de un periodo de funcionamiento.
  - %: porcentaje de apertura de las compuertas del EAHE.
- Periodo 2: utilizada únicamente si en un mismo día hay 3 periodos distintos de utilización del EAHE.

- H inicio 2: hora de inicio del Periodo 2, en caso de haber 3 periodos.
  - H fin 2: hora de finalización del Periodo 2, en caso de haber 3 periodos.
  - %: porcentaje de apertura de las compuertas del EAHE.
- Periodo 3: recoge los datos de la hora de fin y porcentaje de apertura de las compuertas del periodo de aprovechamiento del EAHE, y en ocasiones, también la hora de inicio.
  - H inicio 3: hora de inicio del Periodo 3, en caso de haber 2 o 3 periodos.
  - H fin 3: hora de finalización del Periodo 1 en caso de no haber más de un periodo de funcionamiento; hora de finalización del Periodo 2 y 3, en caso de haber 3 o 2 periodos, respectivamente.
  - %: porcentaje de apertura de las compuertas del EAHE.
- Total: sumatorio total de las horas de uso.
  - Duración: duración total del funcionamiento del intercambiador en ese día.
  - % uso: cociente entre la duración del funcionamiento del intercambiador ese día y las 12 horas que el centro está abierto (sin valorar si el funcionamiento del EAHE tuvo lugar en el horario de apertura o no). Expresado en tanto por ciento. Es decir, porcentaje de las horas de uso de entre las horas 12 horas al día que abre el centro.
- Al 100%: sumatorio total de las horas de uso en las que las compuertas estaban abiertas exclusivamente al 100% de su capacidad.
  - H 100%: horas de funcionamiento al 100% de ese día.
  - % H al 100%: cociente entre la duración del funcionamiento del intercambiador al 100% ese día y las 12 horas que el centro está abierto (sin valorar si el funcionamiento del EAHE tuvo lugar en el horario de apertura o no). Expresado en tanto por ciento. Es decir, porcentaje de las horas de apertura de las compuertas al 100% de su capacidad de entre las horas 12 horas al día que abre el centro.
- Franja 8-20h: discrimina los datos que estén fuera del horario de apertura del edificio, de 8 de la mañana a 8 de la tarde (20 p.m.)
  - H 8-20: horas de funcionamiento en la franja 8-20h de ese día.
  - % 8-20: cociente entre la duración del funcionamiento del intercambiador en la franja 8-20h ese día y las 12 horas que el centro está abierto. Expresado en tanto por ciento. Es decir, porcentaje de las horas de uso en la franja 8-20h de entre las horas 12 horas al día que abre el centro.

Tras analizar los datos de SCADA se percibió que, en caso de funcionamiento fraccionado de la apertura de las compuertas, nunca se superaron más de tres periodos distintos, lo que justifica la elección de los bloques “Periodo 1/2/3”, y no más.

Tabla 16. Ejemplo de tabla utilizada para el tratamiento de los datos obtenidos del sistema SCADA.

DIAS			Periodo 1			Periodo 2			Periodo 3			Total		al 100%		franja 8-20	
N	Día		H inicio 1	H fin 1	%	H inicio 2	H fin 2	%	H inicio 3	H fin 3	%	Duración	% uso	H 100%	% H al 100%	H 8-20	% 8-20
1	03/02/20	L	7:58:46	11:43:52	100				14:13:54	19:59:01	100	9:30:13	79%	9:30:13	79%	9:28:59	79%
2	04/02/20	M	7:59:09	13:29:15	100				16:44:19	19:14:21	37	8:00:08	67%	5:30:06	46%	7:59:17	67%
3	05/02/20	X	7:59:30	12:59:35	100				16:29:35	18:14:37	9	6:45:07	56%	5:00:05	42%	6:44:37	56%
4	06/02/20	J	7:59:50	12:59:56	100				15:14:53	17:59:56	36	7:45:09	65%	5:00:06	42%	7:44:59	65%
5	07/02/20	V	7:45:07							13:30:13	100	5:45:06	48%	5:45:06	48%	5:30:13	46%

Replicando la Tabla 13 al resto de meses se obtienen unos resultados que conforman la Tabla 15:

Tabla 17. Valores promedio, mediana y sumatorio de cada mes de distintos parámetros analizados.

	2019						2020			PROMEDIO
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	
<b>prom H inicio 1</b>	10:42:41	13:21:57	11:18:40	9:00:29	8:00:45	7:46:02	8:15:37	8:38:41	8:44:41	<b>9:32:10</b>
<b>mediana H inicio 1</b>	10:42:41	13:00:06	12:23:06	8:05:44	8:10:11	7:49:41	7:54:44	7:51:18	7:56:12	<b>9:19:18</b>
<b>prom H fin 3</b>	19:52:03	19:49:15	18:15:45	18:18:43	18:37:44	17:33:04	16:01:07	17:38:20	19:28:20	<b>18:23:49</b>
<b>mediana H fin 3</b>	19:52:03	19:45:32	19:53:14	19:49:16	19:55:20	19:45:17	14:23:17	18:51:26	19:53:38	<b>19:07:40</b>
<b>prom Duración</b>	8:30:14	6:27:18	6:06:17	7:29:39	10:06:28	9:47:01	7:26:20	7:16:13	9:04:27	<b>8:01:33</b>
<b>suma Sem Tot</b>	195:35:23	71:00:15	91:34:17	157:22:33	192:02:57	107:37:13	126:27:35	138:08:05	90:44:34	<b>130:03:39</b>
<b>suma Sem Tot/días</b>	41:05:03	20:36:05	30:07:04	36:39:48	38:24:35	31:06:20	37:48:15	28:42:08	18:08:55	<b>31:24:15</b>
<b>prom Duracion 100%</b>	8:30:14	6:27:18	5:40:16	5:34:38	10:06:28	9:47:01	7:26:20	6:48:05	9:43:29	<b>7:47:05</b>
<b>prom % H al 100%</b>	71%	54%	47%	46%	84%	82%	62%	57%	81%	<b>65%</b>
<b>prom Duracion 8-20</b>	8:28:26	6:27:18	6:06:17	7:29:39	10:00:54	9:33:04	7:21:10	7:08:47	9:01:07	<b>7:57:25</b>
<b>suma Sem 8-20</b>	194:54:06	71:00:15	91:34:17	157:22:33	190:17:05	105:03:40	124:59:48	135:47:00	90:11:11	<b>129:01:06</b>
<b>suma Sem 8-20/días</b>	40:56:47	20:36:05	30:07:04	36:39:48	38:03:25	30:22:50	37:21:42	28:11:58	18:02:14	<b>31:09:06</b>
<b>prom % 8-20</b>	71%	54%	51%	62%	83%	80%	61%	60%	75%	<b>66%</b>

La tabla inmediatamente anterior recoge valores promedio, de la mediana y sumatorios de los meses estudiados; en su parte derecha, incluye una columna, PROMEDIO, con los valores promedio de los datos de la parte izquierda. El contenido de las distintas filas se explica a continuación:

- prom H inicio 1: promedio de las horas de inicio 1 (consultar la explicación de la Tabla 13 para más detalles sobre qué es la Hora de inicio 1; extensible al resto de filas de la Tabla 14)).
- mediana H inicio 1: promedio mensual de las horas de inicio 1.
- prom H fin 3: promedio mensual de las horas de fin 3.
- mediana H fin 3: promedio mensual de las horas de fin 3.
- prom Duración: promedio mensual de duración por día del funcionamiento del EAHE (sin valorar si el funcionamiento del EAHE tuvo lugar en el horario de apertura o no).
- suma Sem Tot: sumatorio mensual de las horas de funcionamiento del EAHE.
- suma Sem Tot/días: sumatorio mensual de las horas de funcionamiento del EAHE dividido entre el número de días que ha estado activo.
- prom Duración 100%: promedio mensual de actividad del EAHE al 100% de su capacidad al día (sin valorar si el funcionamiento del EAHE tuvo lugar en el horario de apertura o no).
- prom % H al 100%: promedio mensual del porcentaje de las horas de apertura de las compuertas al 100% de su capacidad de entre las horas 12 horas al día que abre el centro.
- prom Duración 8-20: promedio mensual de actividad del EAHE en la franja 8-20h al día.
- suma Sem 8-20: sumatorio mensual de las horas de funcionamiento del EAHE en la franja 8-20h.
- suma Sem 8-20/días: sumatorio mensual de las horas de funcionamiento del EAHE en la franja 8-20h dividido entre el número de días que ha estado activo.
- prom % 8-20: promedio mensual del porcentaje de las horas de apertura de las compuertas en la franja 8-20h de entre las horas 12 horas al día que abre el centro.

Graficar alguno de los parámetros analizados en la tabla anterior puede ayudar a extraer conclusiones. Por ejemplo, que las duraciones medias diarias sin restricciones, al 100% y en la franja 8-20h son muy próximas, lo que implica que la mayoría del tiempo que el intercambiador entra en funcionamiento lo hace en el horario de apertura del centro y al 100% de su capacidad.

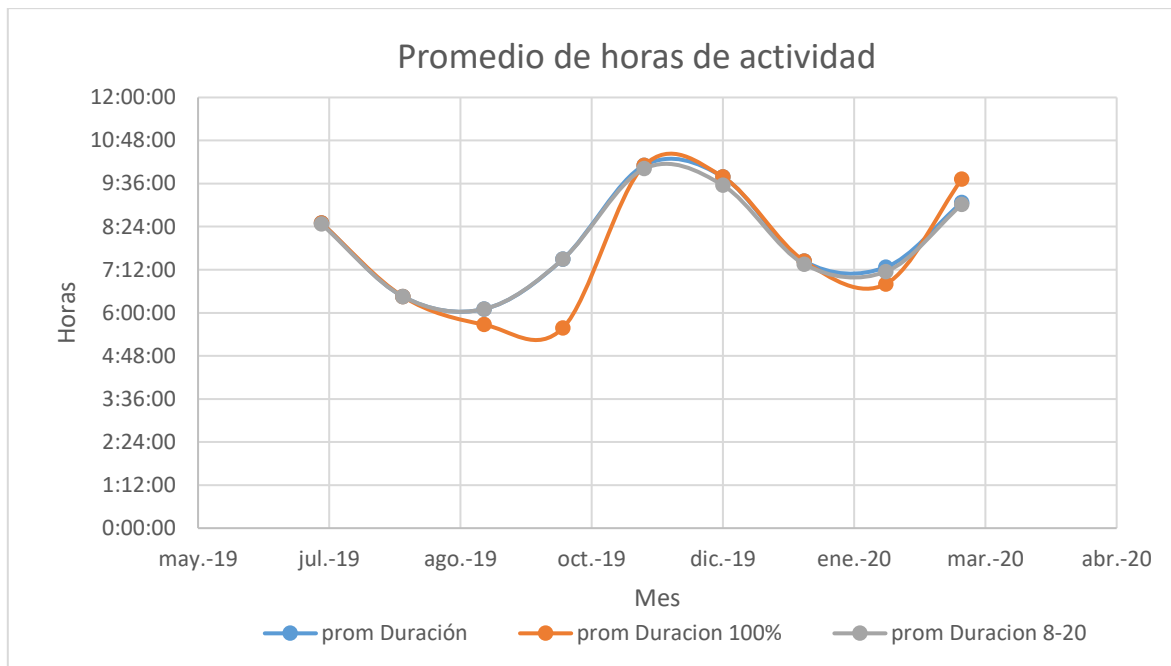


Figura 15. Promedio de horas de actividad sin ninguna restricción, sólo cuando las compuertas estaban abiertas al 100% de su capacidad y cuando estuvieron abiertas en la franja 8-20h.

Si se atiende a los porcentajes, con objeto de obtener una referencia relativa, se observa que la media de utilización dentro de la franja 8-20h (que resulta extrapolable a la explotación de medidas sin restricciones y a la de la apertura de compuertas al 100%, pues se ha visto que son prácticamente iguales), es del 66%, con meses que superan el 80%. Así lo evidencia la siguiente figura:

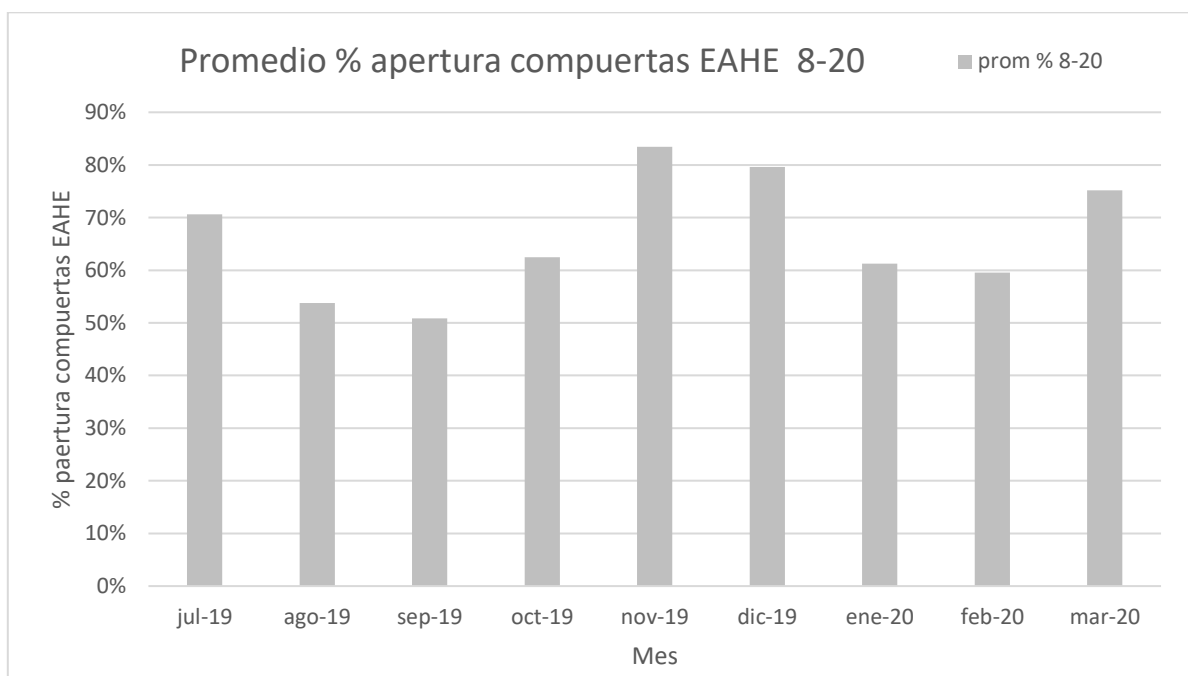


Figura 16. Promedio del porcentaje de apertura de las compuertas del EAHE en la franja 8-20h.

Por otro lado, poniendo el ojo en la evolución del promedio de la hora a la que las compuertas abrían su paso por primera vez en el día (Figura 17), se observan dos periodos en los que la curva describe una tendencia positiva, es decir, se retrasa. El primero, el intervalo de julio a



agosto, y el segundo, los meses posteriores a enero. Un retraso en la hora de inicio implica una reducción del número de horas que el intercambiador estaría en funcionamiento, y por consiguiente, una disminución del aprovechamiento del EAHE. Este fenómeno puede deberse a la saturación térmica del terreno, que conlleva una disminución de la efectividad del intercambiador. En el caso de agosto, después de las altas temperaturas de junio y julio, el terreno se calienta, reduciendo la diferencia de temperatura con el ambiente exterior. En enero tiene lugar el fenómeno inverso, ya que el terreno se enfría después de las bajas temperaturas de noviembre y diciembre.

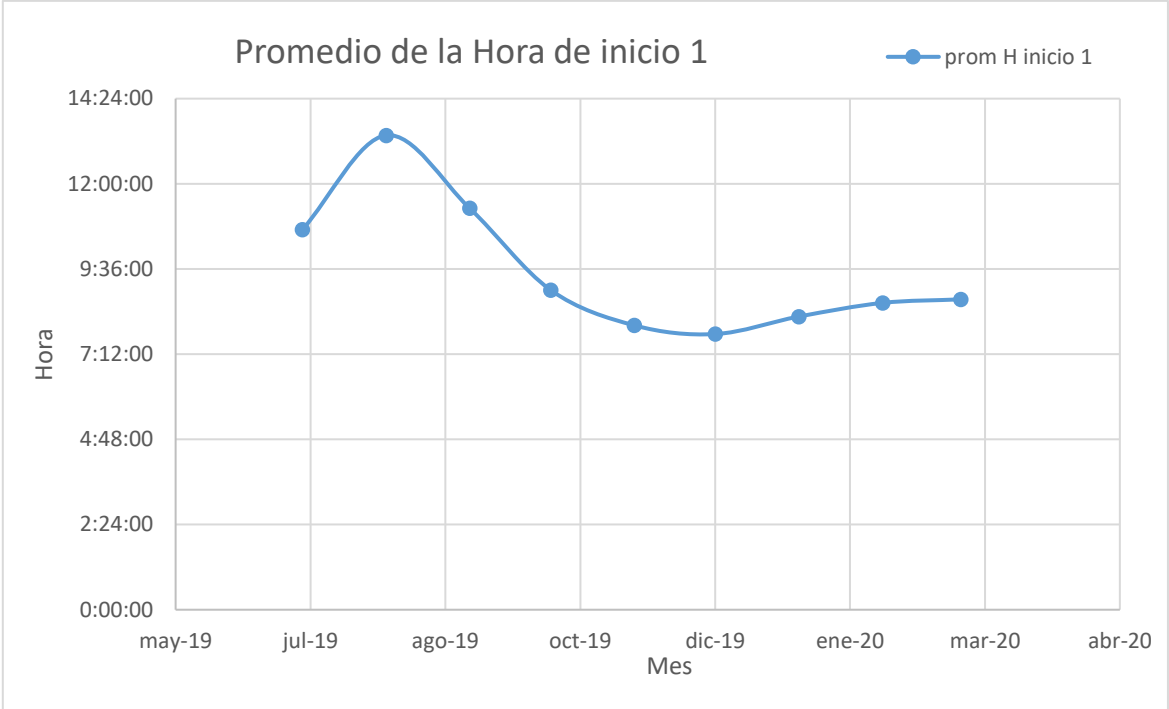


Figura 17. Evolución del promedio de la Hora de inicio 1 a lo largo de los meses.

El fenómeno expuesto anteriormente se percibe también en la Figura 16, en la que la duración de funcionamiento diario promedio se reduce progresivamente en los meses julio, agosto, y septiembre, por un lado, y enero y febrero, por otro.

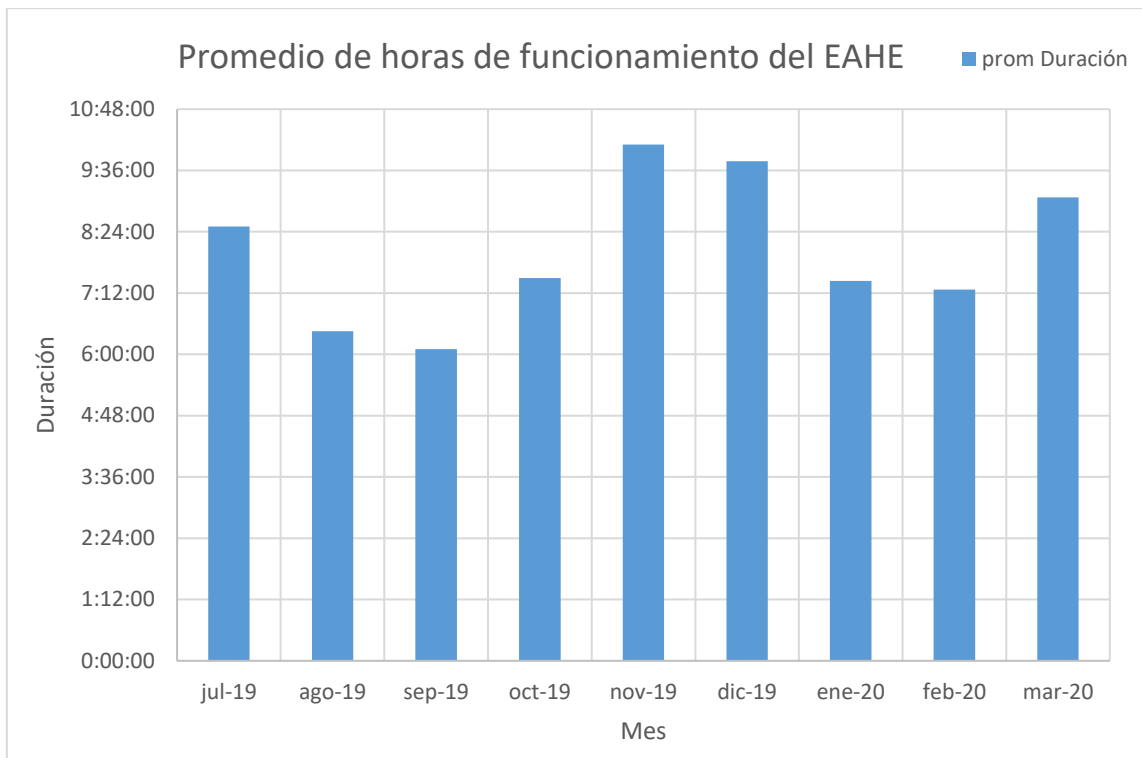


Figura 18. Evolución del promedio de horas de funcionamiento del intercambiador.

Al contrario que con la hora de inicio, la hora de fin se mantiene, de forma general, casi constante, a excepción del mes de enero. Esta excepcionalidad puede deberse a unas altas temperaturas (en comparación a otros años), pues en palabras del Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, “Ha sido el noveno enero más cálido de este siglo, con una temperatura media 0,5°C más alta que el promedio” [38].

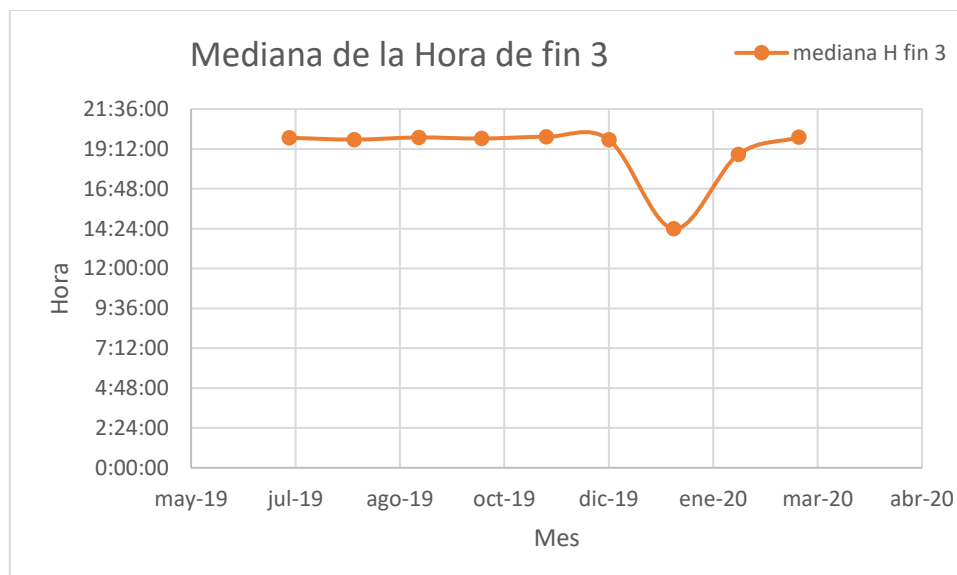


Figura 19. Evolución del promedio de la Hora de finalización 3 a lo largo de los meses.

#### 4.3 Cruce de datos: medición de sondas y apertura de compuertas

Como se explicó anteriormente, los meses en los que se dispone de mediciones de las sondas no coinciden exactamente con los registros recuperados del sistema SCADA; sin embargo, en

este apartado se explotarán las fechas en las que sí se solapan ambos registros. De esta forma, se calculará la energía recuperada por el intercambiador.

A pesar de descargar originalmente los datos en ficheros diferentes, por motivos de eficiencia se agruparon los registros coincidentes para una misma fecha y hora en un único fichero. Éste, a su vez, y como se había hecho con anterioridad, descompone los datos por meses.

El objetivo es calcular la energía recuperada en el EAHE, y para ello, se han empleado las siguientes fórmulas:

$$E = P \cdot t \quad [kJ]$$

Donde:

- E, Energía recuperada [kJ].
- P, Potencia calorífica [kJ/s].
- t, tiempo [s].

El tiempo t, es, en este caso, el intervalo entre mediciones, esto es, 10 minutos, que equivalen a 600 segundos. El cálculo de la Potencia calorífica, P, es más complejo, pero se rige por la siguiente expresión:

$$P = \frac{Q}{V_{\text{específico}}} * \Delta T * C_{p \text{ ah}} \quad \left[ \frac{kJ}{s} \right]$$

Donde:

- P, Potencia calorífica [kJ/s].
- Q, Caudal que circula por los tubos del EAHE [m<sup>3</sup>/s].

Gracias a trabajos anteriores [38], en los que, con un balómetro, se midió el caudal que circulaba a través de 9 de los 52 tubos, se dispone del promedio de caudal que circula por un tubo del intercambiador.

- Caudal promedio por tubo, Q\_promedio: 255,56 m<sup>3</sup>/h\*tubo.
- Nº tubos del EAHE del edificio LUCIA, N\_tubos: 52 tubos.
- Caudal del EAHE al 100% de su capacidad:

$$Q_{100\%} = Q_{\text{promedio}} \cdot N_{\text{tubos}} = 255,56 \cdot 52 = 13289 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{100\%} = 13289 \frac{m^3}{h} = 3,7 \frac{m^3}{s}$$

- V\_específico, volumen específico [m<sup>3</sup>/ kg aire seco].
- ΔT, diferencia entre las temperaturas tomadas por las sondas a la entrada (T ext) y la salida (T int) del EAHE [°C].
- C p aire húmedo, calor específico a presión constante del aire húmedo [kJ/ kg\*°K].

El volumen específico depende en cada registro de la temperatura y la presión del aire seco:

$$V_{\text{específico}} = \frac{R_a \cdot (T_{\text{ext}} + 273)}{P_{\text{as}}}$$

Donde:

- $R_a$ , la constante universal de los gases.

Donde:

$$R_a = \frac{R}{PM_a} = \frac{8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})}{0,02897 \text{ kg}_{\text{as}}/\text{mol}} = 286,986 \frac{\text{J}}{\text{kg}_{\text{as}} \cdot \text{K}}$$

- $T_{\text{ext}}$ , temperatura a la entrada del intercambiador [°C].
- $P_{\text{as}}$ , Presión del aire seco [Pa].

Donde:

$$P_{\text{as}} = P_a - P_v \quad [\text{Pa}]$$

Donde:

- $P_a$ , Presión total [Pa].

$$P_a = 101325 \cdot (1 - 2,25577 \cdot 10^{-5} \cdot z)^{5,2559}$$

Siendo “z” la altitud, que, en el caso de Valladolid, donde se localiza el edificio LUCIA es igual a 698 m.

$$P_a = 101325 \cdot (1 - 2,25577 \cdot 10^{-5} \cdot 698)^{5,2559} = 93216 \text{ Pa}$$

- $P_v$ , Presión de vapor [Pa].

Donde:

$$P_v = \frac{HR}{100} \cdot P_{v \text{ sat}}$$

$P_{v \text{ sat}}$ , Presión de vapor saturado [Pa].

Y a su vez:

$$P_{v \text{ sat}} = \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{(T_{\text{ext}} + 273) - 37,58}\right)$$

Luego, sustituyendo todos los términos para tener una única ecuación:

$$V_{\text{específico}} = 286,986 \cdot \frac{(T + 273)}{93216 - \frac{HR}{100} \cdot \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{(T + 273) - 37,58}\right)} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{as}}} \right]$$

Ahora es el turno del calor específico a presión constante del aire húmedo, que ha sido calculado con la siguiente expresión:

$$C_{p \text{ aire húmedo}} = C_{p \text{ aire seco}} + C_{p \text{ vapor}} \cdot x \left[ \frac{KJ}{Kg \cdot K} \right]$$

Donde:

- $C_{p\_aire \text{ seco}}$ , calor específico del aire seco a presión constante:

$$C_{p \text{ aire seco}} = 1,005 \frac{KJ}{Kg \cdot K}$$

- $C_{p\_vapor}$ , calor específico del vapor a presión constane:

$$C_{p \text{ vapor}} = 1,9 \frac{KJ}{Kg \cdot K}$$

- $x$ , humedad específica:

$$x = 0,622 \cdot \frac{P_v}{P_T - P_v}$$

Donde:

- $P_v$ , presión de vapor [Pa]:

$$P_v = \frac{HR}{100} \cdot P_{v \text{ sat}} = \frac{HR}{100} \cdot \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{(T + 273) - 37,58}\right)$$

- $P_T$ , Presión de la torre, que en este caso es la presión atmosférica [Pa]:

$$P_T = P_a = 101325 \cdot (1 - 2,25577 \cdot 10^{-5} \cdot z)^{5,2559}$$

con  $z = 698 \text{ m}$ .

$$P_a = 101325 \cdot (1 - 2,25577 \cdot 10^{-5} \cdot 698)^{5,2559} = 93216 \text{ Pa}$$

Por lo que la humedad específica queda tal que:

$$x = 0,622 \cdot \frac{\frac{HR}{100} \cdot \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{(T + 273) - 37,58}\right)}{93216 - \frac{HR}{100} \cdot \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{(T + 273) - 37,58}\right)}$$

Y consecuentemente, el calor específico del aire húmedo a presión constante:

$$C_{p \text{ ah}} = 1,005 + 1,9 \cdot 0,622 \cdot \frac{\frac{HR}{100} \cdot \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{(T + 273) - 37,58}\right)}{93216 - \frac{HR}{100} \cdot \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{(T + 273) - 37,58}\right)}$$

A partir de los datos cruzados de las sondas con los de SCADA, a los que se les han anexionado las expresiones explicadas sobre estas líneas, se ha construido la Tabla 16, que recoge, para cada registro, los datos necesarios para calcular los parámetros anteriormente explicados.

Columna a columna, éstas contienen:

- Día: muestra el día del registro.

- Hora: representa la hora del registro.
- T<sub>ext 1</sub>: recoge la medición del canal 1 de la sonda testo 175T2, registrada en el propio dispositivo que se fijó a la reja antipájaros, a la entrada del intercambiador [°C].
- T<sub>int</sub>: medición de la sonda testo 175H1, colocada a la salida del intercambiador[°C].
- ΔT: diferencia entre los valores de las columnas que representan la temperatura a la entrada y salida del intercambiador:

$$\Delta T_{ext\ 1}^{int} = T_{int} - T_{ext\ 1}$$

- HR: humedad relativa; recuperada de las mediciones de la sonda testo 175H1, colocada a la salida del intercambiador, bajo la hipótesis de que este parámetro se mantiene constante, y es igual a la entrada y a la salida del EAHE.
- T+273: operación para pasar los grados Celsius a Kelvin, en este caso la temperatura T<sub>ext 1</sub> [°K].
- V<sub>esp</sub>, volumen específico [m<sup>3</sup>/k as].
- Apertura: porcentaje de apertura de las compuertas del EAHE.
- Q, caudal circulando a través del intercambiador en ese intervalo de tiempo; se calcula multiplicando el caudal que atraviesa el intercambiador al 100% de su capacidad por el porcentaje de apertura que tengan las compuertas del EAHE en ese intervalo de tiempo:

$$Q_{EAHE} = Q_{100\%} \cdot \%Apertura \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

- x: humedad específica.
- C<sub>p ah</sub>: calor específico del aire húmedo a presión constante [kJ/kg\*K].
- Pot: Potencia calorífica [kJ/s].
- Δt: intervalo de tiempo entre registros; en este caso son 10 minutos, que equivalen a 600 segundos.
- Energía: energía intercambiada en el EAHE en el intervalo de tiempo de un registro concreto [kJ].

Tabla 18. Cruce de datos recuperados de las sondas y del sistema SCADA, junto con el cálculo de la energía recuperada y los parámetros necesarios para llegar a ese resultado.

		[°]	[°]	[°]	[%]	[°]	[m <sup>3</sup> /Kg as]	[%]	[m <sup>3</sup> /s]	(hum_esp)	[KJ/Kg*K]	[KJ/s]	[s]	[KJ]
Fecha	Día	T ext 1	T int	Δ T	HR	T+273	V_esp	Apertura	Q	x	C p ah	Pot	Δt	Energía
03/02/2020	8:00:00	5,80	9,3	3,50	84	278,8	0,87	100%	3,70	0,0052	1,0	15,2	600	9111
03/02/2020	8:10:00	5,70	9,2	3,50	84	278,7	0,87	100%	3,70	0,0052	1,0	15,2	600	9114
03/02/2020	8:20:00	5,50	9	3,50	85	278,5	0,86	100%	3,70	0,0051	1,0	15,2	600	9120
03/02/2020	8:30:00	5,20	8,9	3,70	85	278,2	0,86	100%	3,70	0,0050	1,0	16,1	600	9652
03/02/2020	8:40:00	5,10	8,9	3,80	85	278,1	0,86	100%	3,70	0,0050	1,0	16,5	600	9916
03/02/2020	8:50:00	5,00	8,9	3,90	85	278	0,86	100%	3,70	0,0049	1,0	17,0	600	10180
03/02/2020	9:00:00	5,00	8,8	3,80	85	278	0,86	100%	3,70	0,0049	1,0	16,5	600	9919

Para cada uno de los intervalos se realiza un sumatorio de la energía intercambiada, de modo que se obtiene la energía recuperada cada mes. A partir de esos sumatorios se compuso la siguiente tabla:

Tabla 19. Sumatorio de la energía intercambiada cada mes en GJ y kWh.

	2019			2020			
	Julio	-	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Sumatorio
<b>TOTAL [GJ]</b>	14,02	-	4,74	10,51	7,36	17,66	<b>54,29</b>
<b>TOTAL [kWh]</b>	3894,92	-	1316,19	2920,59	2044,62	4904,73	<b>15081,05</b>

Conociendo estos valores, el siguiente paso consiste en calcular el coste de obtener esta misma cantidad de energía mediante otros medios.

#### 4.3.1 Refrigeración

En el caso de la estación estival, las necesidades principales son de refrigeración; la enfriadora que alimenta la batería de frío de la UTA cuenta con un EER (Energy Efficiency Ratio, en español Ratio de Eficiencia Energética) de 3,1, lo que significa que por cada 1 kWh eléctrico consumo, aporta 3,1 kWh térmicos.

Se ha recuperado una factura del mes de julio del edificio LUCIA, que se rige por la tarifa de electricidad del Campus Miguel Delibes (Tarifa de 6 periodos), que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 20. Ejemplo de factura eléctrica del mes de julio para el edificio LUCIA.

	kWh	€/ kWh		€	%
Periodo	Consumo	Precio		Coste	f
P1	171240	0,110659	=	18949	18%
P2	251873	0,10027	=	25255	24%
P6	930549	0,066938	=	62289	58%
<b>TOTAL</b>	<b>1.353.662</b>			<b>106.494</b>	

Con el objetivo de obtener un único precio, tratando de que sea lo más representativo posible, se ha realizado el siguiente cálculo:

$$\text{Precio único, } PU = \sum_i^{n=6} (\text{Precio}_i \cdot f_i)$$

$$PU = 0,08262241 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Así pues, para el caso de julio, aplicando el ratio EER a la energía ahorrada, se obtienen las necesidades de energía eléctrica para transformar la energía térmica correspondiente:

$$\text{Necesidades eléctricas} = \frac{\text{Ahorro energético julio}}{\text{EER}} = \frac{3894,42}{3,1} = 1256,26 \text{ kWh}$$

Multiplicando ese valor por el coste que ésta hubiera tenido, se obtendría el ahorro económico:

$$\text{Ahorro económico julio} = \text{Necesidades eléctricas} \cdot PU$$

$$\text{Ahorro económico julio} = 1256,26 \cdot 0,08262241 = 116 \text{ €}$$

No obstante, además de un ahorro económico, también se produce un ahorro energético que se traduce en una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>. El cálculo se realiza a continuación, con el factor de emisiones del CO<sub>2</sub> de la electricidad convencional peninsular, medido en kg CO<sub>2</sub>/kWh E. final [41]:

$$\text{Reducción de emisiones de CO}_2 = \text{Necesidades eléctricas} \cdot \text{factor emisión CO}_2$$

$$\text{Reducción de emisiones de CO}_2 = 1256,26 \cdot 0,331 = 415,8 \text{ kg CO}_2$$

Unas emisiones de 415 kg de CO<sub>2</sub> suponen el equivalente a un viaje en coche de 2075 km (10 veces la distancia Valladolid-Madrid).

Para opinar sobre si este ahorro es mucho o poco, es conveniente compararlo con el gasto que supondría transformar la misma cantidad de energía sin el EAHE. Para ello, se recurre a la demanda de refrigeración del mes de julio, que es de 39262 kWh [42].

A nivel energético:

$$\% \text{ ahorro energético}_{EAHE} = \frac{\text{Ahorro EAHE}}{\text{Consumo si 100\% UTA}}$$



$$\% \text{ ahorro energético}_{EAHE} = \frac{3894,42}{39262} \cdot 100 = 9,92 \%$$

En el plano económico:

$$\text{Necesidades eléctricas} = \frac{\text{Necesidades refrigeración}}{EER} = \frac{39262}{3,1} = 12665 \text{ kWh}$$

$$\text{Coste económico} = \text{Necesidades eléctricas} \cdot \text{PU}$$

$$\text{Coste económico} = 12665 \cdot 0,08262241 = 1046 \text{ €}$$

$$\% \text{ ahorro económico}_{EAHE} = \frac{\text{Ahorro EAHE}}{\text{Coste si 100\% UTA}} = \frac{116}{1046} \cdot 100 = 11 \%$$

En cuanto a las emisiones:

$$\text{Emisiones de CO}_2 = \text{Necesidades eléctricas} \cdot \text{factor emisión CO}_2$$

$$\text{Emisiones de CO}_2 = 12665 \cdot 0,331 = 4192,11 \text{ kg CO}_2$$

$$\% \text{ reducción emisiones CO}_2_{EAHE} = \frac{\text{Emisiones evitadas}}{\text{Emisiones si 100\% UTA}}$$

$$\% \text{ reducción emisiones CO}_2_{EAHE} = \frac{415,8}{4192,11} \cdot 100 = 9,92 \%$$

Por tanto, las reducciones de emisiones, de consumo energético y de gasto económico aportadas por el EAHE para el mes de julio representan el 10% del total.

Posteriormente a repetir estos cálculos para los meses en los que hay necesidades de calefacción, se incluye una reflexión sobre los resultados obtenidos.

#### 4.3.2 Calefacción

Para los meses más fríos prima la demanda de calefacción, que en el edificio LUCIA se provee a través de la red de calor de distrito, cuyo generador es una planta de biomasa próxima al edificio, y que alimenta a la batería de calor de la UTA. Ésta tiene un ratio de eficiencia de 0,8, por lo que quiere decir que necesitamos un aporte de (biomasa por valor energético de) 1 kWh para obtener 0,8 kWh. Esto repercute en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, que suman 11186,13 kWh ahorrados. Las necesidades de astillas de biomasa serían:

$$\text{Necesidades biomasa} = \frac{\text{Ahorro energético}(D, E, F, M)}{\text{Eficiencia}} = \frac{11186,13}{0,8} = 13982,66 \text{ kWh}$$

$$\text{Necesidades biomasa} = 13982,66 \text{ kWh} = 50337,6 \text{ kJ}$$

Conociendo el poder calorífico inferior de la biomasa, PCI = 14,832 MJ/kg:

$$\text{Necesidades biomasa (kg)} = \frac{\text{Necesidades biomasa(kJ)}}{PCI} = \frac{50337,6}{14,832} = 3393,85 \text{ kg}$$

$$\text{Necesidades biomasa} = 3393,85 \text{ kg} = 3,39385 \text{ toneladas}$$

Colaborando con este proyecto, la Oficina de Calidad Ambiental y Sostenibilidad de la UVA, facilitó el precio actual que se paga por la astilla de madera para la caldera de biomasa, que en este caso es de 85 €/tonelada [39]:

$$\text{Ahorro económico } (D, E, F, M) = \text{Necesidades biomasa (ton)} \cdot \text{Precio biomasa}$$

$$\text{Ahorro económico } (D, E, F, M) = 3,39385 \cdot 85 = 288,5 \text{ €}$$

La utilización de la caldera de biomasa acarrea consigo unas emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a su actividad. Es más, los factores de emisión de CO<sub>2</sub> se encuentran tabulados [40], siendo el correspondiente a la biomasa de 0,018 kg CO<sub>2</sub>/kWh E. final.

Si se recuperan los kWh de calefacción ahorrados gracias al intercambiador, el cálculo de la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> debido al EAHE será sencillo:

$$\text{Reducción de emisiones de CO}_2 = \text{Necesidades biomasa} \cdot \text{factor emisión CO}_2$$

$$\text{Reducción de emisiones de CO}_2 = 13982,66 \cdot 0,018 = 251,7 \text{ kg CO}_2$$

Por tener una referencia, una emisión de 250 kg de CO<sub>2</sub> supone el equivalente a un viaje en coche de 1250 km (10 veces la distancia Valladolid-Segovia).

No obstante, la ganancia que se acaba de exponer tiene más valor si se mira con un poco más de perspectiva. Imaginemos que no se dispone del EAHE, y que todo el aporte de calor lo realiza la caldera de biomasa. Si se acude a la demanda de calor total de los meses de diciembre, enero y febrero (se excluye marzo para no adulterar el resultado, ya que sólo se estudió la mitad del mes), suma 23117+2560+16759 = 65836 kWh [41], que dividida entre la eficiencia de la caldera de biomasa da un resultado de 82295 kWh; a su vez, este resultado debe ser multiplicado por el factor de emisión de CO<sub>2</sub> de la biomasa da un resultado de 1481,3 kg de CO<sub>2</sub>. Una sencilla división indicará el porcentaje de emisiones evitadas gracias al EAHE en el abastecimiento de las necesidades de calor:

$$\% \text{ reducción emisiones CO}_{2\text{EAHE}} = \frac{\text{Emisiones evitadas}}{\text{Emisiones si 100\% biomasa}}$$

$$\% \text{ reducción emisiones CO}_{2\text{EAHE}} = \frac{251,7}{1481,3} \cdot 100 = 17 \%$$

Las mismas cuentas pueden aplicarse al presupuesto de compra de biomasa:

$$\text{Necesidades biomasa (kWh)} = \frac{\text{Demanda energético}(D, E, F)}{\text{Eficiencia}} = \frac{65836}{0,8} = 82295 \text{ kWh}$$

$$\text{Necesidades biomasa (kg)} = \frac{\text{Necesidades biomasa(kJ)}}{\text{PCI}} = \frac{82295}{14,832} = 5548,5 \text{ kg}$$

$$\text{Necesidades biomasa} = 5548,5 \text{ kg} = 5,5485 \text{ toneladas}$$

$$\text{Coste económico } (D, E, F) = \text{Necesidades biomasa (ton)} \cdot \text{Precio biomasa}$$

$$\text{Coste económico } (D, E, F) = 5,5485 \cdot 85 = 471,6 \text{ €}$$

$$\% \text{ ahorro compra biomasa}_{\text{EAHE}} = \frac{\text{Ahorro EAHE}}{\text{Coste si 100\% biomasa}}$$

$$\% \text{ ahorro compra biomasa}_{EAHE} = \frac{162}{471,6} \cdot 100 = 34,35 \%$$

Y finalmente, también se hace lo propio en el ámbito energético:

$$\% \text{ ahorro energético}_{EAHE} = \frac{\text{Ahorro EAHE}}{\text{Consumo si 100\% UTA}}$$

$$\% \text{ ahorro energético}_{EAHE} = \frac{11186,13}{65836} \cdot 100 = 17 \%$$

Por tanto, los beneficios del EAHE del edificio LUCIA expuestos son principalmente 2:

1. Por un lado, el ahorro económico, aplicable tanto a las necesidades refrigeración, como de calefacción. Concretamente, respecto a las demandas de calefacción, se logra ahorrar el 34% del coste que tendría de trabajar exclusivamente con la caldera de biomasa.
2. Por otro, la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 10% (julio) y un 17% (diciembre, enero y febrero). Aunque no lo parezca, reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> resulta tremendamente importante, pues es uno de los compromisos a cumplir del Pacto Verde Europeo, mencionado al inicio de este TFM. Dentro de este segundo beneficio también va implícito la reducción del consumo energético asociada al EAHE, que comparte los mismo porcentajes que la reducción de emisiones.

En términos absolutos, tanto el ahorro económico, como la reducción de emisiones pueden resultar ínfimas en comparación a los órdenes de magnitud que se manejan a nivel municipal, regional, nacional, europeo o mundial. No obstante, este factor no nos puede llevar a error, ya que son los valores relativos los que más información nos dan.

Que un edificio amplíe o reduzca sus emisiones en un 17% apenas tendrá impacto en la sociedad o el medioambiente. Sin embargo, si esta tecnología se extiende a la gran mayoría de construcciones, esa reducción de emisiones asociada a una ciudad, o a un país, sí tendrá un gran efecto en el freno del avance del Cambio Climático.

Aunque el párrafo anterior pueda parecer utópico, la instalación de intercambiadores Tierra-Aire es mucho más sencilla y barata de lo que cabe imaginar. Muestra de ello es el siguiente epígrafe.

#### 4.4 Coste relativo del EAHE

Este cuarto apartado rompe con la temática de los tres anteriores, que se basaban sobre datos obtenidos a partir de una campaña de medición, y su posterior tratamiento.

Según el portal Construction21 (España) [42], el edificio LUCIA tuvo un coste total de construcción de 7.253.461 €, aunque se desconoce su desglose detallado. Asimismo, se ha rescatado del informe de simulación energética realizado por el Instituto de la Construcción de Castilla y León [41], que la cuantía económica destinada a incluir la construcción de un intercambiador Tierra-Aire en el proyecto fue de 34000 €.

El interés de estas dos cifras comienza en el momento en el que se relaciona la una con la otra, así pues, el coste de construcción del EAHE será expresado en porcentaje sobre el total del proyecto:

$$\% \text{ presupuesto construcción del EAHE} = \frac{\text{Coste del EAHE}}{\text{Coste total de construcción}}$$

$$\% P.C. \text{ del EAHE} = \frac{34.000}{7.253.461} \times 100 = 0,47 \%$$

Este resultado tiene una gran importancia, ya que demuestra que una inversión inferior al 0,5% del presupuesto total devuelve grandes ahorros económicos y de emisiones, como ya se ha comprobado con los porcentajes relativos a calefacción y refrigeración.

## 5 CONCLUSIONES

En base a todo lo expuesto anteriormente, se han elaborado las siguientes conclusiones.

### 5.1 Caracterización del EAHE

En primer término, se han recuperado los conceptos básicos asociados a los EAHE. Este tipo de intercambiadores destacan por su capacidad de apoyo a otros sistemas principales de tratamiento del caudal de aire de ventilación. Reducen la carga térmica que tienen que vencer los equipos principales, con el valor añadido de que su impacto medioambiental es nulo. Del mismo modo, es llamativa la versatilidad de esta tecnología, pues se ha llegado a combinar con otras 14 formas de transformación de energía.

A pesar de los beneficios que aporta, los EAHE no se comportan de la misma manera en todas las situaciones. Por ejemplo, el intercambiador pierde efectividad en ambientes húmedos (climas húmedos, estaciones húmedas). Sin embargo, funciona con mayor eficiencia cuanto más frío es el clima.

El terreno también juega un importante papel en el rendimiento del EAHE. Tres son los factores que destacan: una composición adecuada del terreno, a base de limos, margas y arcillas; un terreno compactado; y un terreno humedecido, que puede aumentar la eficacia del EAHE en un 40%.

### 5.2 Principales aportaciones del autor del TFM

El presente proyecto estudia con detalle el intercambiador de calor Tierra-Aire del edificio LUCIA. Este intercambiador sirve de apoyo al sistema de climatización, responsable de asegurar que el aire impulsado a las distintas estancias del edificio esté en las condiciones adecuadas de humedad y temperatura, para lograr el confort higrotérmico. La principal labor del EAHE es reducir el salto térmico entre el aire exterior y las condiciones del aire de impulsión; al reducir la carga térmica a vencer por la instalación de climatización se produce un triple ahorro: energético, económico y de emisiones de CO<sub>2</sub>.

A partir de los datos recabados por las sondas, se ha observado que el promedio de diferencia de temperaturas a la entrada y salida del EAHE es mayor en los meses de diciembre y enero, que en los meses sucesivos, sin ser febrero o marzo meses mucho más cálidos. Esto puede deberse a la saturación térmica del terreno; es decir, después de meses muy fríos, como noviembre y diciembre, en los que el intercambiador ha sido utilizado a diario durante largos periodos de tiempo, el terreno que rodea los tubos tiende a enfriarse también, reduciendo la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del EAHE. Consecuentemente, la saturación del terreno implica una pérdida de efectividad del intercambiador de calor.

También se observan grandes diferencias de temperatura máximas, tanto para el calentamiento como para el enfriamiento del aire, lo cual puede traducirse en importantes ganancias de energía. Sin embargo, según se ha analizado, los mayores saltos térmicos se dan en la franja 6-10 am, después de crecer ininterrumpidamente durante la noche. No obstante, las compuertas del intercambiador sólo abren (es decir, el intercambiador sólo se aprovecha) en el horario del centro, de 8 am a 20 pm, con lo cual, se está desperdiciando energía que

podría ser utilizada para mantener las condiciones de la consigna de no ocupación, o para acondicionar el ambiente en las horas previas a la ocupación.

Igualmente, puede ser una tecnología con gran margen de aprovechamiento para establecimientos que requieran de un control higrotérmico continuo, como los museos o las bibliotecas, o cuyo horario de funcionamiento incluya periodos nocturnos.

En el extremo opuesto, las diferencias de temperatura mínimas entrada-salida suelen tener lugar en la franja 17:30-19:30 pm, lo que lo convierte en un buen momento para dar descanso al EAHE, y evitar así la saturación del terreno a largo plazo. Cabe señalar que, la temperatura máxima diaria se produce alrededor de las 14 pm, lo que indica una cierta “inercia” entre la temperatura exterior máxima y la saturación.

Las siguientes conclusiones vienen de la mano de las mediciones proporcionadas por el sistema SCADA. Éstas revelaron que, como se ha mencionado recientemente, el intercambiador sólo se aprovecha en el horario de apertura del centro, que es de 8 am a 20 pm. En promedio, durante los meses estudiados, entraba en funcionamiento (como instalación de apoyo al sistema de climatización principal) el 66% del tiempo (dentro de la franja 8-20h), con meses que superaron el 80%.

De nuevo vuelve a aparecer el fenómeno de saturación del terreno, pero esta vez a través de dos fuentes de datos diferentes. Por un lado, analizando la evolución de la hora de inicio más temprana, que tiende a retrasarse a medida que la saturación toma protagonismo. Por otro lado, poniendo el foco en el promedio de horas de funcionamiento del EAHE al mes, que disminuye al tiempo que el firme se satura. Este fenómeno tiene lugar en los intervalos de agosto a septiembre, y de enero a marzo. En ambos casos, los intervalos suceden a periodos de temperaturas “extremas” (cálidas en junio y julio, y frías en noviembre y diciembre).

En lo sucesivo al tratamiento por separado de los datos recuperados de las sondas y de SCADA, se procedió a cruzar ambos registros. Con ello, se realizó el cálculo de la energía recuperada por el EAHE, lo que ha permitido cuantificar la repercusión económica, energética y medioambiental que ha tenido la utilización del intercambiador.

En el campo medioambiental, durante los meses de diciembre, enero, febrero y (la primera mitad de) marzo, el EAHE aportó 11186 kWh debido al intercambio de calor, lo que supone una reducción del 17% del consumo de calefacción. Esto implica que se ha evitado la emisión de 250 kg de CO<sub>2</sub>, lo que supone una reducción de las emisiones del 17%.

En el caso del mes de julio, el aporte del EAHE fue de 3894 kWh, lo que representa un 10% de la demanda total de refrigeración de ese mes. Expresado de otra manera, evitó la emisión de 415 kg de CO<sub>2</sub>, lo que equivale a un 10% del total.

En el ámbito económico, para los meses anteriores más fríos (de entre los estudiados, diciembre, enero, febrero), el ahorro fue de 162 €, o expresado de otro modo, el presupuesto necesario para cubrir la demanda de calefacción se redujo un 34%. En el caso del mes de julio, el ahorro fue de 116 €, un 10% del total.

Finalmente, es especialmente destacable la siguiente realidad: todas las bondades explicadas anteriormente requirieron tan solo el 0,5% del presupuesto total de construcción del edificio.

Así pues, queda retratado el aprovechamiento que hace el edificio LUCIA de su intercambiador, junto con las contribuciones económicas y medioambientales, y que apenas necesitaron una ínfima inversión.

### 5.3 Sugerencias para trabajos futuros

En el presente trabajo, y debido al freno de la pandemia, los datos útiles de las sondas correspondían a meses tradicionalmente fríos, por lo que sería interesante ampliar el análisis y el cruce de registros de sondas a la entrada y salida del intercambiador para otros periodos del año.

Por otro lado, recordando algunas de las aportaciones del Estado del arte, hay ciertas medidas que podrían ser implantadas inmediatamente, con el objetivo de aumentar la eficacia del intercambiador de calor.

Una de ellas es humedecer el terreno del EAHE, puesto que actualmente la zona no dispone de riego. Y la segunda aportación se refiere a modificar el software de control que se ocupa de la apertura de las compuertas del intercambiador, para programar una utilización intermitente; el objetivo es aprovechar los periodos de menor diferencia de temperatura entrada-salida para darle descanso al EAHE, y explotar su uso durante la noche. Evidentemente, la incorporación de estos cambios debería tener un seguimiento, y posterior análisis.

Finalmente, es evidente la apuesta de la Universidad de Valladolid por esta tecnología pasiva, que está presente en tres de sus edificios más recientes (LUCIA, Aulario IndUVa, edificio de I+D+i del Campus Duques de Soria), y sus beneficios ya han sido comentados. No obstante, además de animar a esta institución, así como a cualquier otra que lea este documento, a seguir incorporando los EAHE en sus edificios, también me gustaría proponer algunas variantes comentadas en el Estado de la técnica, que pueden resultar atractivas para futuros proyectos.

En primer lugar, intercambiadores con grandes longitudes de tubo (80 m), que, junto con diámetros pequeños, fomentan la eficacia del intercambio energético.

En segundo lugar, sustituir la disposición horizontal clásica por otra en vertical (en forma de muelle o espiral), idónea cuando hay limitaciones de espacio, aunque acarree un sobrecoste (por la mayor profundidad de excavado). También se ha demostrado que es más efectiva, y facilita la descarga del agua de condensación.

Si de nuevo se encuentran problemas de espacio, otra de las propuestas consiste en prescindir del parcialmente del terreno como medio de intercambio, y sumergir los tubos en una balsa de agua. La propia balsa necesitaría estar enterrada, pero a mucha menos profundidad de lo que es habitual para la solución tradicional. Además, se produce un ahorro económico, pues se reduce la profundidad del terreno excavado y el relleno con un terreno de propiedades específicas.

En último lugar, se encuentra la propuesta de sustituir la solución de múltiples tubos cilíndricos por un gran conducto plano que ocupara la misma área. Este diseño consigue duplicar el ahorro de energía en comparación con la solución tradicional.





## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. W. Davis and P. J. Gertler, "Contribution of air conditioning adoption to future energy use under global warming," 2015. [Online]. Available: <https://www.pnas.org/content/pnas/112/19/5962.full.pdf>.
- [2] J. Houghton, "Global Warming, The Complete Briefing," in *Global Warming, The Complete Briefing, Third Edition*, 2004 (Thir., Cambridge University Press, 2004, pp. 147-174/383.
- [3] Spanish Government, "ERESEE 2020. Actualización 2020 de la Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España," pp. 251/376, 2/376, 197/376, 330-352/376, 2020, [Online]. Available: <https://www.mitma.es/el-ministerio/planes-estrategicos/estrategia-a-largo-plazo-para-la-rehabilitacion-energetica-en-el-sector-de-la-edificacion-en-espana>.
- [4] EII UVa Departamento de Ingeniería Térmica y Fluidomecánica, "GRUPO DE TERMOTECNIA DE LA UNIVERSIDAD DE VALLADOLID." <http://termotecnia.gir.uva.es/index.html> (accessed Dec. 01, 2020).
- [5] Protocolo de Kioto, "Protocolo de Kioto," FCCC/INFORMAL/83. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>, Kioto, 1997. [Online]. Available: [https://unfccc.int/resource/docs/publications/08\\_unfccc\\_kp\\_ref\\_manual.pdf](https://unfccc.int/resource/docs/publications/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf).
- [6] European Commission, "The European Green Deal," *European Commission*. p. 2, 2019.
- [7] D. J. L. Sánchez, "La eficiencia energética de los edificios públicos," 2020. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-feb-17\\_es](https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-feb-17_es).
- [8] European Commission, "Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast)," *Off. J. Eur. Union*, p. 40, 2010, doi: doi:10.3000/17252555.L\_2010.153.eng.
- [9] European Parliament, *Directive 2012/27/EU*, vol. L315/1, no. October. 2012, pp. 1–56.
- [10] Comisión Europea, "Directiva 2012/27/UE del parlamento Europeo y del Consejo," *D. Of. la Unión Eur.*, pp. 1–56, 2012.
- [11] E. L. P. Europeo *et al.*, "Directiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 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," vol. 6, no. 2, pp. 253–254, 2018.
- [12] Consejo de la Unión Europea, "DIRECTIVA (UE) 2018/2002 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 11 de diciembre de 2018 por la que se modifica la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética," vol. 2018, pp. 37–39, 2018, doi: 10.2903/j.efsa.2013.3381.
- [13] E. Performance, B. Directive, and E. E. Directive, "Energy Performance of Buildings Directive," *Struct. Surv.*, vol. 23, no. 1, pp. 1–6, 2005, doi: 10.1108/ss.2005.11023aab.001.
- [14] Comisión Europea, "La Comisión lleva a España ante el Tribunal por los contadores de calefacción y agua caliente de los edificios de apartamentos," *7 marzo 2019*, p. 1, 2019, Accessed: Aug. 17, 2020. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/IP\\_19\\_1473](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/IP_19_1473).
- [15] M. T. Velasco Rincón, "La transposición de la Directiva 2012/27/UE de Eficiencia Energética al marco español," pp. 5–11, 2017, [Online]. Available: [http://www.enerclub.es/file/bZ\\_P6kNHSwR2iNPDVJtl\\_A](http://www.enerclub.es/file/bZ_P6kNHSwR2iNPDVJtl_A).
- [16] M. of Energy, "National Plan for Energy Efficiency Actions 2017-2020," p. 225, 2017, [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/es\\_neeap\\_2017\\_es.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/es_neeap_2017_es.pdf).

- [17] IDAE, “Bases Del Programa De Ayudas Para La Rehabilitación Energética De Edificios Existentes (Pareer-Crece),” 2015, [Online]. Available: [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_PAREER-CRECE-texto\\_refundido\\_y\\_consolidado\\_478cff4.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_PAREER-CRECE-texto_refundido_y_consolidado_478cff4.pdf).
- [18] BOE 4/2020, “Boletín Oficial del Estado,” *Boletín Of. del Estado*, pp. 61561–61567, 2015.
- [19] Gobierno de España, “Real Decreto 106/2018. de 9 de marzo, por el Plan Estatal de Vivienda 2018-2021,” p. 15, 2018, [Online]. Available: [http://www.pp.es/sites/default/files/documentos/plan\\_estatal\\_de\\_vivienda\\_2018-2021.pdf](http://www.pp.es/sites/default/files/documentos/plan_estatal_de_vivienda_2018-2021.pdf).
- [20] I. US EPA, OAR,ORIA, “Introduction to indoor air quality,” *Indoor Air*, vol. last updat, pp. 3–5, 2013, [Online]. Available: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/introduction-indoor-air-quality>.
- [21] P. P. O. R. S and P. E. L. May, “Índice de calidad del aire: cómo medir la calidad del aire residencial | S&P,” pp. 1–6, 2020, [Online]. Available: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/indice-calidad-aire/>.
- [22] E. and T. Ministry of Industry, “Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios,” *BOE 207 29/08/2007 Sec 1*, pp. 35931–35984, 2007, [Online]. Available: <http://www.minetad.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reglamento/RDecreto-1027-2007-Consolidado-9092013.pdf>.
- [23] G. de España, “Documento Básico HS,” *Septiembre*, vol. 2013, pp. 1–129, 2007, [Online]. Available: <http://www.arquitectura-tecnica.com/hit/Hit2016-2/DBHE.pdf>.
- [24] A. T. González, “CLIMATIZACIÓN Calidad del Aire Interior y Ventilación.” Ana Tejero González, Valladolid (España), pp. 1–67, 2019.
- [25] K. K. Agrawal, R. Misra, G. Das Agrawal, M. Bhardwaj, and D. K. Jamuwa, “The state of art on the applications, technology integration, and latest research trends of earth-air-heat exchanger system,” *Geothermics*, vol. 82, no. January, p. 17, 2019, doi: 10.1016/j.geothermics.2019.05.011.
- [26] F. Ascione, L. Bellia, and F. Minichiello, “Earth-to-air heat exchangers for Italian climates,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 8, p. 1, 2011, doi: 10.1016/j.renene.2011.01.013.
- [27] G. Yoon, H. Tanaka, and M. Okumiya, “Study on the design procedure for a multi-cool/heat tube system,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 8, pp. 1–10, 2009, doi: 10.1016/j.solener.2009.03.010.
- [28] A. Rouag, A. Benchabane, and C. E. Mehdid, “Thermal design of Earth-to-Air Heat Exchanger. Part I a new transient semi-analytical model for determining soil temperature,” *J. Clean. Prod.*, vol. 182, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.089.
- [29] Q. Liu, Z. Du, and Y. Fan, “Heat and mass transfer behavior prediction and thermal performance analysis of earth-to-air heat exchanger by finite volume method,” *Energies*, vol. 11, no. 6, pp. 1–19, 2018, doi: 10.3390/en11061542.
- [30] S. S. Bharadwaj and N. K. Bansal, “Temperature distribution inside ground for various surface conditions,” *Build. Environ.*, vol. 16, no. 3, pp. 1–10, 1981, doi: 10.1016/0360-1323(81)90012-3.
- [31] G. Chiesa, “Climate-potential of earth-To-Air heat exchangers,” *Energy Procedia*, vol. 122, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.300.
- [32] A. Mathur, Priyam, S. Mathur, G. D. Agrawal, and J. Mathur, “Comparative study of straight and spiral earth air tunnel heat exchanger system operated in cooling and heating modes,” *Renew. Energy*, vol. 108, pp. 1–14, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.03.001.
- [33] D. D’Agostino, F. Esposito, A. Greco, C. Masselli, and F. Minichiello, “Parametric analysis on an

- earth-to-air heat exchanger employed in an air conditioning system," *Energies*, vol. 13, no. 11, pp. 1–24, 2020, doi: 10.3390/en13112925.
- [34] C. Gutiérrez and F. Valbuena, "Intercambiador tierra-aire," pp. 1–20.
- [35] A. Rodríguez, "Estudio de alternativas para la reducción de consumos en instalaciones de climatización de edificios en el sector terciario," Universidad de Valladolid, 2020.
- [36] Testo SE & Co. KGaA, "Testo.com - Data logger testo 175 T2," 2021.  
<https://www.testo.com/es-ES/data-logger-testo-175-t2/p/0572-1752>.
- [37] Testo SE & Co. KGaA, "Testo.com - Data logger testo 175 H1." <https://www.testo.com/es-ES/data-logger-testo-175-h1/p/0572-1754> (accessed Jan. 31, 2021).
- [38] "Enero de 2020, un mes cálido y con récords de precipitación," 2021.  
[https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/enero-de-2020-un-mes-cálido-y-con-récords-de-precipitación/tcm:30-506943#:~:text=Resumen mes de enero&text=El mes de enero ha,el comienzo del siglo XXI.](https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/enero-de-2020-un-mes-cálido-y-con-récords-de-precipitación/tcm:30-506943#:~:text=Resumen%20mes%20de%20enero&text=El%20mes%20de%20enero%20ha,%20el%20comienzo%20del%20siglo%20XXI.) (accessed May 21, 2021).
- [39] Universidad de Valladolid, "OFICINA DE CALIDAD AMBIENTAL Y SOSTENIBILIDAD."  
<https://www.uva.es/export/sites/uva/7.comunidaduniversitaria/7.09.oficinacalidadambiental/> (accessed May 20, 2021).
- [40] E. y T. Ministerio de Industria, "Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España," 2016. [Online]. Available:  
[http://www.minetad.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros documentos/Factores\\_emision\\_CO2.pdf](http://www.minetad.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros%20documentos/Factores_emision_CO2.pdf).
- [41] Instituto de la Construcción de Castilla y León, "Informe simulación energética edificio Lanzadera Universitaria de Centro de Investigación Aplicada - LUCIA -," 2013. [Online]. Available: <https://www.construction21.org/espana/data/sources/users/882/docs/b03-03-simulacion-equest-lucia.pdf>.
- [42] Construction21 España, "EdificioLUCIA - Construction21," 2014.  
<https://www.construction21.org/espana/case-studies/es/lucia-lanzadera-universitaria-de-centros-de-investigacion-aplicada.html> (accessed May 16, 2021).