



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID  
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES  
Grado en Ingeniería en Organización Industrial**

**ECONOMÍA CIRCULAR. APLICACIÓN A UN EDIFICIO DE  
CONSUMO ENERGÉTICO CASI NULO, nZEB.**

**Autor:**

**Sáenz de Santa María Hernández, Elena**

**Tutores:**

**Dr. Fr. Javier Rey Martínez**

**Dr. Javier M. Rey Hernández**

**Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica**

**Valladolid, Junio 2024.**

EC aplicado a un edificio de consumo energético casi nulo

## **AGRADECIMIENTOS:**

*"Me gustaría agradecer a todas las personas que han colaborado en la realización y finalización de este Trabajo de Fin de Grado. En primer lugar, agradezco a mi tutor, Fr. Javier Rey Martínez, cuya guía experta y apoyo constante han sido cruciales durante todo el proceso de investigación, y un pilar fundamental para mi crecimiento y formación como estudiante de Ingeniería en Organización Industrial.*

*Quisiera también dar gracias a la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid por darme la oportunidad y facilitarme los recursos necesarios para desarrollar este proyecto.*

*Además, agradecer también a mis amigos por su motivación y valiosas sugerencias, y a todas las personas que participaron en la investigación, dedicando su tiempo y compartiendo sus conocimientos.*

*Igualmente, quiero extender mi agradecimiento a mi familia, cuyo continuo apoyo, comprensión y confianza en mí durante este período académico, han sido fundamentales."*



## RESUMEN:

El sector de la construcción en la UE es responsable de casi el 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto implica que reducir la huella de carbono de los edificios nuevos y renovados es una prioridad clave para alcanzar el objetivo de convertirse en un continente de emisiones netas cero para 2050. El Pacto Verde de la UE, el principal instrumento político en la UE para la transición verde, establece cuatro vectores relevantes en el ámbito de la construcción: Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo (nZEB), edificios con altos niveles de confort, edificios inteligentes y edificios que utilizan principios de economía circular y análisis del ciclo de vida (ACV). Los principios de una economía circular aplicados a los edificios pueden ayudar a reducir los residuos, disminuir la dependencia de los recursos naturales y finitos, y promover diseños que faciliten la recuperación y reutilización de recursos a lo largo de su ciclo de vida.

Este trabajo de investigación se centra en estudiar cómo los principios de la economía circular pueden aplicarse a un edificio de energía casi nula (nZEB), tanto en la fase de diseño (materiales de construcción) como en la fase operativa (recuperación de agua y energía). El objetivo es proporcionar evidencia sobre cómo el sector de la construcción puede transformarse mediante la adopción de prácticas más sostenibles que conduzcan a un uso más efectivo de los recursos naturales, permitiendo que se reutilicen y reciclen en lugar de ser desechados. El estudio implica un análisis cuantitativo de la economía circular centrado en los recursos naturales aplicados al edificio de la universidad LUCIA (UVA), que está certificado como el mejor nZEB en el hemisferio norte según la certificación LEED. Detallará el funcionamiento actual del edificio y realizará un análisis exhaustivo de la gestión de recursos hídricos, materiales de construcción y energía térmica recuperada a través de la obtención de calor geotérmico e intercambiadores de calor aire-aire en un sistema de ventilación inteligente. A partir del diseño arquitectónico y la selección de materiales reciclados para el edificio nZEB, el estudio también considerará el consumo de recursos durante la fase operativa, incluida el agua y la energía recuperada del sistema de ventilación del edificio.

El objetivo es identificar áreas de mejora y proponer nuevas estrategias de economía circular que puedan aplicarse tanto al edificio LUCIA como a otros nZEB. En última instancia, este enfoque promueve la creación de edificios más eficientes y descarbonizados a lo largo de su ciclo de vida, alineándose con los objetivos de sostenibilidad establecidos por la UE.

**Palabras clave:** Economía Circular, Edificios de Energía Casi Nula (nZEBs), Diseño de Edificios Sostenibles, Análisis del Ciclo de Vida (ACV).

## **ABSTRACT:**

The building sector in the EU is responsible for almost 40% of greenhouse gas emissions. This implies that reducing the carbon footprint of new and renovated buildings is a key priority to achieve the goal of becoming a net-zero emissions continent by 2050. The EU's Green Deal, the flagship policy instrument in the EU for the green transition, establishes four relevant vectors in the building domain, namely: Nearly Zero Energy Buildings (nZEBs), buildings with high levels of health and comfort, smart buildings, and buildings that use circular economy and Life Cycle Assessment (LCA) principles. The principles of a circular economy applied to buildings can help reduce waste, decrease dependence on natural and finite resources, and promote designs that facilitate resource recovery and reuse throughout their life cycle.

This research work focuses on studying how circular economy principles can be applied to a nearly zero energy building (nZEB), both in the design phase (construction materials) and in the operational phase (water and energy recovery). The aim is to provide evidence on how the building sector can be transformed by adopting more sustainable practices that lead to more effective use of natural resources, enabling them to be reused and recycled instead of being disposed of. The study involves a quantitative analysis of circular economy focused on natural resources applied to the LUCIA university building (UVA), which is certified as the best nZEB in the northern Hemisphere according to the LEED Certification. It will detail the current functioning of the building and conduct a comprehensive analysis of water resource management, recycled construction materials, and recovered heat energy through geothermal heat recovery and air-to-air heat exchangers in a Smart ventilation system during its operational phase. Starting from the architectural design and selection of recycled materials for the nZEB building, the study will also consider resource consumption during the operational phase, including water and energy recovered from the building's ventilation air system.

The objective is to identify areas for improvement and propose new circular economy strategies that can be applied to both the LUCIA building and other nZEBs. Ultimately, this approach promotes the creation of more efficient and decarbonized buildings throughout their life cycle, aligning with the sustainability goals established by the EU.

**Key words:** Circular Economy, Nearly Zero Energy Buildings (nZEBs), Sustainable Building Design, Life Cycle Assessment (LCA).

## ÍNDICE:

1. OBJETIVOS:.....	1
2. INTRODUCCIÓN DE IMPORTANCIA DE LA ECONOMÍA CIRCULAR.....	3
3. APLICACIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR A LA EDIFICACIÓN. ....	9
4. CASO DE ESTUDIO; EDIFICIO NZEB (LUCÍA).....	15
5. APLICACIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR AL EDIFICIO (NZEB).....	21
5.1. RECURSOS:.....	25
5.1.1. MATERIALES Y SU RECICLAJE. ....	25
5.1.2. RECURSOS ENERGÉTICOS/GESTIÓN ENERGÉTICA: AHORRO DE ENERGÍAS Y ENERGÍAS RENOVABLES. ....	39
5.1.2.1 TECNOLOGÍA DE RECUPERACIÓN Y AHORRO. ....	42
- HVAC LUCIA:.....	44
5.1.2.2 TECNOLOGÍAS RENOVABLES. ....	55
- BIOMASA: District heating. ....	56
- GEOTERMIA DEL AIRE. ....	67
5.1.3. GESTIÓN DEL RECURSO AGUA.....	76
- APROVECHAMIENTO DE AGUAS GRISES Y PLUVIALES ..... 76	
6. CONCLUSIONES.....	88
FUTUROS TRABAJOS: .....	93
7. BIBLIOGRAFÍA.....	94





## Ilustraciones:

<b>Ilustración 1.</b> Economía lineal vs Economía circular. Fuente: GBCE. (2021) Economía circular en la edificación. green building council España. <a href="https://gbce.es/documentos/Informe_Economia-Circular.pdf">https://gbce.es/documentos/Informe_Economia-Circular.pdf</a> .....	3
<b>Ilustración 2.</b> Esquema de economía circular. Fuente: Comisión Europea. Hacia una economía circular: un programa de cero residuos para Europa. COM (2014) 398 final <a href="https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:50edd1fd-01ec-11e4-831f-01aa75ed71a1.0009.02/DOC_1&amp;format=PDF">https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:50edd1fd-01ec-11e4-831f-01aa75ed71a1.0009.02/DOC_1&amp;format=PDF</a> .....	4
<b>Ilustración 3.</b> Esquema de las 9 R. Fuente: GISCI-UPM. Economía circular. Universidad Politécnica de Madrid. <a href="https://blogs.upm.es/gisci/economia-circular/">https://blogs.upm.es/gisci/economia-circular/</a> .....	5
<b>Ilustración 4.</b> Esquema Diagrama Mariposa. Fuente: Ellen MacArthur Foundation (2020). .....	6
<b>Ilustración 5.</b> EC Fases de la construcción. Fuente: Varios autores (2018), Economía circular en el sector de la construcción, Congreso Nacional del Medio Ambiente, CONAMA 2018. <a href="https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/130254/CONAMA_Economia%20Circular_2018.pdf;sequence=1">https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/130254/CONAMA_Economia%20Circular_2018.pdf;sequence=1</a> .....	7
<b>Ilustración 6.</b> Esquema De Economía Circular en la construcción. Fuente: Varios autores. Economía circular en el sector de la construcción. Grupo de trabajo GT-6 Congreso Nacional del Medioambiente, CONAMA 2018. <a href="https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/130254/CONAMA_Economia%20Circular_2018.pdf;sequence=1">https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/130254/CONAMA_Economia%20Circular_2018.pdf;sequence=1</a> .....	10
<b>Ilustración 7.</b> Ciclos de materia y energía en las fases de construcción de los edificios. Rahla, K. M., Mateus, R., & Bragança, L. (2021, 7 de abril). Implementing Circular Economy Strategies in Buildings - From Theory to Practice. Applied System Innovation, 4(2), 26. <a href="https://doi.org/10.3390/asi4020026">https://doi.org/10.3390/asi4020026</a> .....	12
<b>Ilustración 8.</b> Edificio LUCIA.....	15
<b>Ilustración 9.</b> Edificio LUCIA.....	15
<b>Ilustración 10.</b> Niveles de Certificación LEED .....	19
<b>Ilustración 11.</b> Categorías Certificación LEED.....	19
<b>Ilustración 12.</b> LEVELS DE LA UE. Fuente: Instituto de Tecnología de la Construcción. ..	23
<b>Ilustración 13.</b> Equipos de recuperación de energía (HX y enfriamiento evaporativo indirecto) integrados en el sistema UTA. ....	44
<b>Ilustración 15.</b> Sistema de climatización. ....	46
<b>Ilustración 16.</b> Sistema de Unidad de Tratamiento de Aire con recuperación evaporativo indirecta (UTA-HX). ....	46
<b>Ilustración 17.</b> Sistema de climatización HVAC. SCADA.....	48
<b>Ilustración 18.</b> Central de biomasa UVA.....	58
<b>Ilustración 19.</b> Esquema funcionamiento central biomasa UVA. Fuente: Elaboración propia.....	59
<b>Ilustración 20.</b> DHS Universidad de Valladolid y Central Térmica. ....	59
<b>Ilustración 21.</b> Red de distribución Valladolid. Fuente: UVa_Online. ....	60
<b>Ilustración 22.</b> Red distribución DHS.....	60
<b>Ilustración 23.</b> Esquema subestación de calor. Fuente: Galindo Llorente, P. (2018). Estudio del consumo energético en un District Heating (DH) de la Universidad de Valladolid [Trabajo Fin de Grado. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales]. UVaDOC. <a href="https://uvadoc.uva.es/handle/10324/28844">https://uvadoc.uva.es/handle/10324/28844</a> .....	61

<b>Ilustración 25.</b> Edificio LUCIA y Central Térmica. Distancia red.....	63
<b>Ilustración 26.</b> Subestación edificio LUCIA.....	63
<b>Ilustración 27.</b> Vista sección de tubos en el terreno .....	68
<b>Ilustración 28.</b> Plano descriptivo de la instalación. Corte vertical.....	68
<b>Ilustración 29.</b> Instalación tubos geotérmicos enterrados. Fase construcción. ....	68
<b>Ilustración 30.</b> Tomas de aire sistema de geotermia. ....	69
<b>Ilustración 31.</b> Toma de aire sistema de geotermia. Fase construcción. ....	69
<b>Ilustración 32.</b> Salida tubos geotérmicos.....	70
<b>Ilustración 33.</b> Esquema UTA. EAHx. Fuente: Vegas Barbado, S. (2016). ESTUDIO DE UN RECUPERADOR DE ENERGÍA GEOTÉRMICA APLICADO A UN EDIFICIO UNIVERSITARIO. [Trabajo fin de Grado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid]. .	71
<b>Ilustración 34.</b> Diseño de instalación de agua en el LUCIA, nZEB. Valbuena García, F.J. (2016) Edificio Lucía: edificio para Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada. EdUva. ....	80
<b>Ilustración 36.</b> Lucernarios.....	99
<b>Ilustración 37.</b> Tecnología vidrio fotovoltaico transparente.....	100
<b>Ilustración 38.</b> Triple vidrio laminado .....	101
<b>Ilustración 39.</b> Panel solar fachada sur.....	101

## Tablas:

<b>Tabla 1.</b> Resumen estrategias diseño. Fuente: Elaboración propia a partir de Departamento de Arquitectura de la UVA.....	18
<b>Tabla 2.</b> EDP materiales. Fuente: Departamento Arquitectura de la UVA. ....	35
<b>Tabla 3.</b> Consumo eléctrico mensual KWh año 2023. Fuente: Elaboración propia.....	41
<b>Tabla 4.</b> Consumo de ventilación simulado. Fuente: Elaboración propia. ....	47
<b>Tabla 5.</b> Consumos totales DH UVA. Fuente: Elaboración propia.....	62
<b>Tabla 6.</b> Demanda de calor total del edificio. ....	65
<b>Tabla 7.</b> Datos de interés instalación geotermia. ....	67
<b>Tabla 8.</b> Calor recuperado por EAHX y tiempo de funcionamiento.....	75
<b>Tabla 9.</b> Volumen de suministro de agua. Fuente: Elaboración propia a partir de Valbuena García, F.J. (2016) Edificio Lucía: edificio para Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada. EdUVA.....	77
<b>Tabla 10.</b> dispositivos de flujo máximo. Fuente: Elaboración propia a partir de Valbuena García, F.J. (2016) Edificio Lucía: edificio para Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada. EdUVA. ....	78
<b>Tabla 11.</b> Caudal máximo de agua reutilizable. Fuente: Valbuena García, F.J. (2016) Edificio Lucía: edificio para Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada. EdUVA. ....	81
<b>Tabla 12.</b> Consumo energético del ciclo del agua. Fuente: Elaboración propia a partir de Valbuena García, F.J. (2016) Edificio Lucía: edificio para Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada. EdUVA.....	82
<b>Tabla 13.</b> Consumo energético abastecimiento del ciclo del agua. Fuente: Elaboración propia a partir de Valbuena García, F.J. (2016) Edificio Lucía: edificio para Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada. EdUVA.....	83
<b>Tabla 14.</b> Consumo energético saneamiento del ciclo del agua. Fuente: Elaboración propia a partir de Valbuena García, F.J. (2016) Edificio Lucía: edificio para Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada. EdUVA.....	83
<b>Tabla 15.</b> Energía almacenada en ciclo total del agua. Fuente: Elaboración propia a partir de Valbuena García, F.J. (2016) Edificio Lucía: edificio para Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada. EdUVA.....	84
<b>Tabla 16.</b> Consumo de energía primaria total y emisiones de CO2 .....	85
<b>Tabla 17.</b> Consumo energético y emisiones CO2 evitadas. Fuente: Elaboración propia. ....	91
<b>Tabla 18.</b> Resultados evaluación impacto ambiental LUCIA. Fuente: Departamento de Arquitectura de la UVA.....	92

## Gráficos:

<b>Gráfico 1.</b> %Total de materiales reciclados. Fuente: Elaboración propia.....	37
<b>Gráfico 2.</b> % Total materiales reutilizables. Fuente: Elaboración propia.....	37
<b>Gráfico 3.</b> Porcentaje total material reutilizable usado en la construcción. Fuente: Elaboración propia.....	38
<b>Gráfico 4.</b> % Ahorro energético. Fuente: Elaboración propia.....	39
<b>Gráfico 5.</b> Consumo de energía LUCIA en 2017. Fuente: Rey-Hernández, J.M. (2019). Energy and Environmental Sustainability of a Zero.Energy & Zero-Carbon Building. [Tesis de Doctorado, Escuela de Doctorado Universidad de Valladolid].....	40
<b>Gráfico 6.</b> Energía totalizada subsistema en KWh año 2023. Fuente: Elaboración propia.....	41
<b>Gráfico 7.</b> Consumo de ventilación simulado. Fuente: Elaboración propia.....	47
<b>Gráfico 8.</b> Horas de funcionamiento al mes del sistema HVAC. Rey-Hernández, J. M., San José Alonso, J. F., Velasco Gómez, E., Yousif, C., y Rey Martínez, F. J. (2020). Performance analysis of a hybrid ventilation system in a near zero energy building. Building and Environment 185 2020, 107265. ELSEVIER, 12 <a href="https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107265">https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107265</a> .....	47
<b>Gráfico 9.</b> Empleo de sistemas en función de las condiciones climáticas. Rey-Hernández, J. M., San José Alonso, J. F., Velasco Gómez, E., Yousif, C., y Rey Martínez, F. J. (2020). Performance analysis of a hybrid ventilation system in a near zero energy building. Building and Environment 185 2020, 107265. ELSEVIER, 12 <a href="https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107265">https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107265</a> .....	49
<b>Gráfico 10.</b> Consumo de energía de UTA cuando se utiliza en modo freecooling, con la compuerta de entrada EAHX y la compuerta externa para diferentes meses. Rey-Hernández, J. M., San José Alonso, J. F., Velasco Gómez, E., Yousif, C., y Rey Martínez, F. J. (2020). Performance analysis of a hybrid ventilation system in a near zero energy building. Building and Environment 185 2020, 107265. ELSEVIER, 12 <a href="https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107265">https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107265</a> .....	50
<b>Gráfico 11.</b> Consumo de energía de UTA cuando se utiliza el intercambiador AHU-HX, a través de la compuerta de entrada de aire EAHX y a través de la compuerta de entrada de aire exterior al mes. Rey-Hernández, J. M., San José Alonso, J. F., Velasco Gómez, E., Yousif, C., y Rey Martínez, F. J. (2020). Performance analysis of a hybrid ventilation system in a near zero energy building. Building and Environment 185 2020, 107265. ELSEVIER, 12 <a href="https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107265">https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107265</a> .....	51
<b>Gráfico 12.</b> Comparación del consumo de energía de los ventiladores para el modo Free Cooling y el modo AHU-HX a través de la compuerta del intercambiador de calor geotérmico por mes. Rey-Hernández, J. M., San José Alonso, J. F., Velasco Gómez, E., Yousif, C., y Rey Martínez, F. J. (2020). Performance analysis of a hybrid ventilation system in a near zero energy building. Building and Environment 185 2020, 107265. ELSEVIER, 12 <a href="https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107265">https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107265</a> .....	52
<b>Gráfico 13.</b> Energía recuperada con el sistema de ventilación. Fuente: Elaboración propia.....	53
<b>Gráfico 14.</b> Costos económicos de energía en LUCIA nZEB por estrategia de ventilación.....	53
<b>Gráfico 15.</b> Ahorro económico con la recuperación de energía. Fuente: Elaboración propia.....	54

<b>Gráfico 16.</b> Energía renovable empleada. Fuente: Elaboración propia.....	55
<b>Gráfico 17.</b> Demanda de calor total del edificio. Fuente: Elaboración propia. ....	65
<b>Gráfico 18.</b> Resultado monitorización temperaturas. Febrero 2016. Fuente: Vegas Barbado, S. (2016). ESTUDIO DE UN RECUPERADOR DE ENERGÍA GEOTÉRMICA APLICADO A UN EDIFICIO UNIVERSITARIO. [Trabajo fin de Grado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid]. ....	72
<b>Gráfico 19.</b> Resultado monitorización velocidad de ventilación. Febrero 2016. Fuente: Vegas Barbado, S. (2016). ESTUDIO DE UN RECUPERADOR DE ENERGÍA GEOTÉRMICA APLICADO A UN EDIFICIO UNIVERSITARIO. [Trabajo fin de Grado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid]. ....	73
<b>Gráfico 20.</b> Resultados monitorización temperaturas. Julio 2015. Fuente: Vegas Barbado, S. (2016). ESTUDIO DE UN RECUPERADOR DE ENERGÍA GEOTÉRMICA APLICADO A UN EDIFICIO UNIVERSITARIO. [Trabajo fin de Grado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid]. ....	73
<b>Gráfico 21.</b> Resultado monitorización velocidad de ventilación. Agosto 2015. Fuente: Fuente: Vegas Barbado, S. (2016). ESTUDIO DE UN RECUPERADOR DE ENERGÍA GEOTÉRMICA APLICADO A UN EDIFICIO UNIVERSITARIO. [Trabajo fin de Grado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid].....	74
<b>Gráfico 22.</b> Calor recuperado por EAHX en Kwh. Fuente: Elaboración propia.....	75
<b>Gráfico 23.</b> Energía almacenada en el ciclo del agua total. Fuente: Elaboración propia.	84
<b>Gráfico 24.</b> Porcentaje total de agua reutilizable. Fuente: Elaboración propia. ....	85
<b>Gráfico 25.</b> Porcentaje ahorro energético agua. Fuente: Elaboración propia.....	86
<b>Gráfico 26.</b> Resumen porcentajes reciclaje, reutilización, ahorro y recuperación. Fuente: Elaboración propia.....	90

EC aplicado a un edificio de consumo energético casi nulo

## 1. OBJETIVOS:

El presente proyecto tiene cuatro objetivos:

- 1) Proporcionar evidencia sobre cómo el sector de la construcción puede transformarse mediante la adopción de prácticas más sostenibles que conduzcan a un uso más efectivo de los recursos naturales, permitiendo que se reutilicen y reciclen en lugar de ser desechados.
- 2) Justificar cómo la economía circular puede aplicarse a un edificio de energía casi nulo (nZEB), tanto en la fase de diseño (materiales de construcción) como en la fase operativa (recuperación de agua y energía).
- 3) Detallar el funcionamiento actual del edificio LUCIA de la Universidad de Valladolid y realizar un análisis cuantitativo de la economía circular centrado en los recursos naturales aplicados.
- 4) Promover la creación de edificios más eficientes y descarbonizados a lo largo de su ciclo de vida, alineándose con los objetivos de sostenibilidad establecidos por la UE.

A partir de estos puntos, se pretende fomentar la adopción de prácticas más sostenibles en el sector de la construcción transformando la forma en que se utilizan los recursos naturales, promoviendo la reutilización y el reciclaje en lugar de la eliminación, y contribuyendo así a un futuro más sostenible en la UE.



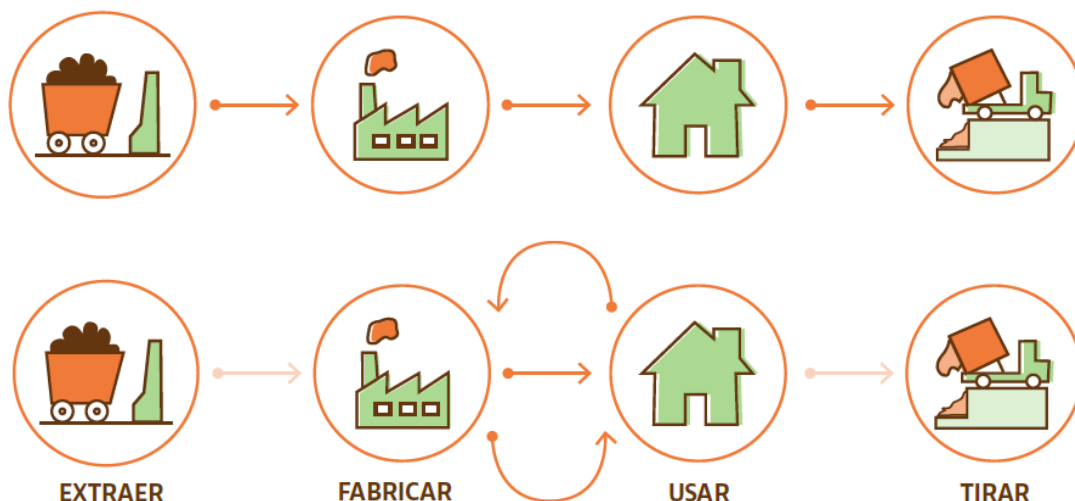


## 2. INTRODUCCIÓN DE IMPORTANCIA DE LA ECONOMÍA CIRCULAR.

El agotamiento de los recursos junto con el cambio climático, son problemas críticos que enfrenta la humanidad en la actualidad. Estos desafíos están interconectados y tienen consecuencias significativas para el medio ambiente, la economía y la sociedad en su conjunto, provocando una importante crisis a nivel global.

Un factor clave a tener en cuenta para comprender esta crisis ambiental que enfrentamos, es el actual modelo de producción y consumo llamado "**economía lineal**". Este sistema económico, recoge la idea de "producir, usar y tirar". Dicho modelo, ha sido exitoso en términos de crecimiento económico y aumento de la producción de bienes y servicios, pero a costa de la degradación ambiental y el agotamiento de recursos. La suposición de que los recursos naturales son inagotables, ha llevado a un uso insostenible de estos, generando una gran cantidad de residuos y contaminación en todo el mundo.

Para abordar esta situación, muchos expertos y organizaciones abogan por un cambio hacia una **economía circular**. En contraste con la economía lineal, la economía circular promueve la idea de que los residuos de un proceso pueden convertirse en recursos para otro, creando un ciclo natural continuo que integra la idea de reutilizar, reciclar y regenerar los materiales y productos, teniendo en cuenta todos sus ciclos de vida (desde la extracción de recursos naturales hasta el tratamiento de los residuos cuando llega su final de vida útil). Este enfoque representa un cambio radical en la forma en que producimos y consumimos, con el objetivo de crear sistemas más eficientes y sostenibles.



*Ilustración 1. Economía lineal vs Economía circular. Fuente: GBCE. (2021) Economía circular en la edificación. green building council España. [https://gbce.es/documentos/Informe\\_Economia-Circular.pdf](https://gbce.es/documentos/Informe_Economia-Circular.pdf)*

La transición hacia una economía circular es un componente clave en la estrategia de la Unión Europea para alcanzar la descarbonización en 2050. Al transformar la forma en que los recursos son utilizados y gestionados, la economía circular no solo ayudaría a abordar los desafíos ambientales, sino que también podría generar nuevos beneficios y oportunidades económicas y sociales. Implementar la digitalización y las nuevas tecnologías, así como la promoción de la eficiencia energética y de recursos es clave para lograr la circularidad.

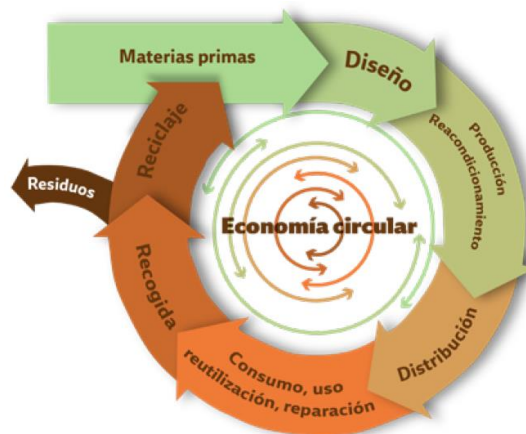
La economía circular es un concepto que ha ido evolucionando a lo largo del tiempo a partir de ideas sobre sostenibilidad y gestión de recursos.

En los años 70, se empezaron a cuestionar los modelos económicos tradicionales de consumo lineal. En este contexto, surgieron los primeros conceptos relacionados con la sostenibilidad y la ecología industrial.

Más tarde, el término "economía circular" comenzó a ser utilizado y aplicado más frecuentemente en diversos sectores de la sociedad. Se inició el desarrollo de teorías, como "La economía del rendimiento".

En el siglo XXI, la Fundación Ellen MacArthur, establecida en 2010, se convirtió en una de las principales defensoras del concepto, colaborando con gobiernos y empresas y realizando investigaciones para fomentar el empleo de este modelo. Desde este momento, la economía circular se estructuró en tres estrategias fundamentales:


- **Diseño para la Durabilidad:** Reducir el uso de materias primas, agua y energía, y priorizar el uso de recursos renovables y secundarios, diseñados para durar más tiempo.
- **Reutilización y Reciclaje:** Prolongar la vida útil de productos y materiales el máximo tiempo posible.
- **Regeneración de Sistemas Naturales:** Fomentar procesos que regeneren ecosistemas y recursos naturales.



*Ilustración 2. Esquema de economía circular. Fuente: Comisión Europea. Hacia una economía circular: un programa de cero residuos para Europa. COM (2014) 398 final [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:50edd1fd-01ec-11e4-831f-01aa75ed71a1.0009.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:50edd1fd-01ec-11e4-831f-01aa75ed71a1.0009.02/DOC_1&format=PDF)*

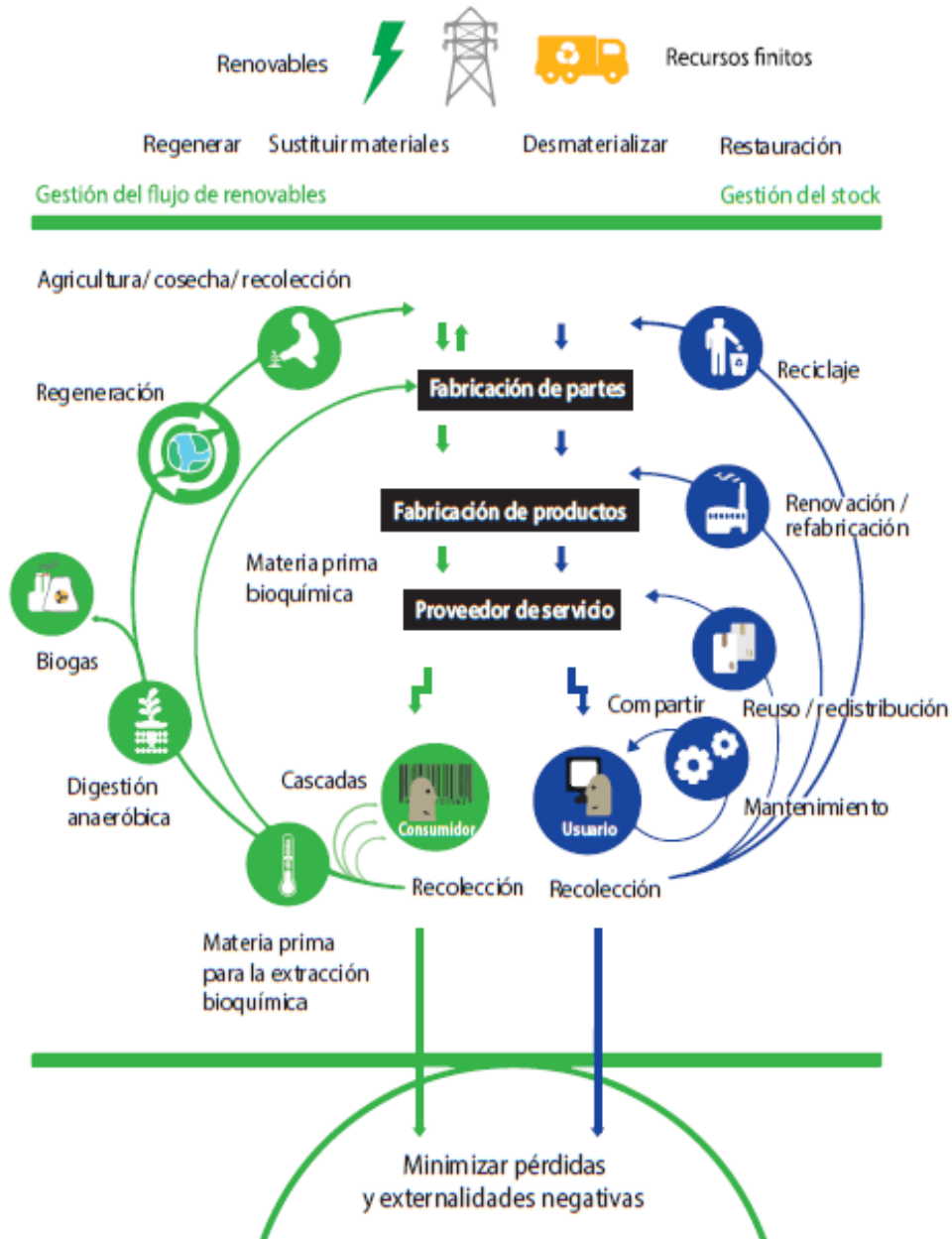
Desde el año 2010 hasta la actualidad, la economía circular ha ganado un significativo reconocimiento internacional y se incorpora en multitud de políticas gubernamentales y estrategias empresariales. Para fomentar la transición hacia una economía circular, la UE está adoptando planes de acción y regulaciones como el Pacto Verde Europeo (2019).

Una de las herramientas clave para implementar la economía circular es la **Ley de las 9R**, que establece estrategias y acciones clave para aumentar la circularidad e innovación en el diseño de productos. Esta ley se organiza en tres estrategias clave, cada una de ellas con tres acciones específicas. A continuación, se muestran por orden de prioridad:

ECONOMÍA CIRCULAR		Estrategias	
	Utilización y manufactura inteligente	R0 Rechazar	Hacer un producto redundante mediante el abandono de su función u ofreciendo la misma función con un producto radicalmente diferente.
		R1 Repensar	Hacer más intensivo el uso de un producto (p.e. compartiéndolo).
		R2 Reducir	Incrementar la eficiencia en el uso o manufactura de un producto mediante la reducción del consumo de los recursos o materiales.
	Extensión de la vida de un producto o sus partes	R3 Reutilizar	Reutilización por parte de nuevos consumidores/as de un producto descartado que aún está en buenas condiciones y cumple su función original.
		R4 Reparar	Reparar y mantener un producto defectuoso de tal forma que puede ser utilizado para su función original.
		R5 Renovar	Restaurar un producto viejo y actualizarlo.
		R6 Remanufacturar	Usar componentes de un producto descartado en un producto nuevo con la misma función.
	Aplicación útil de materiales	R7 Re-proponer	Usar un producto descartado o sus componentes en un nuevo producto con diferente función.
		R8 Reciclar	Procesar materiales para obtener otros de la misma calidad o inferior.
R9 Recuperar		Incineración de materiales con recuperación de energía.	
ECONOMÍA LINEAL			

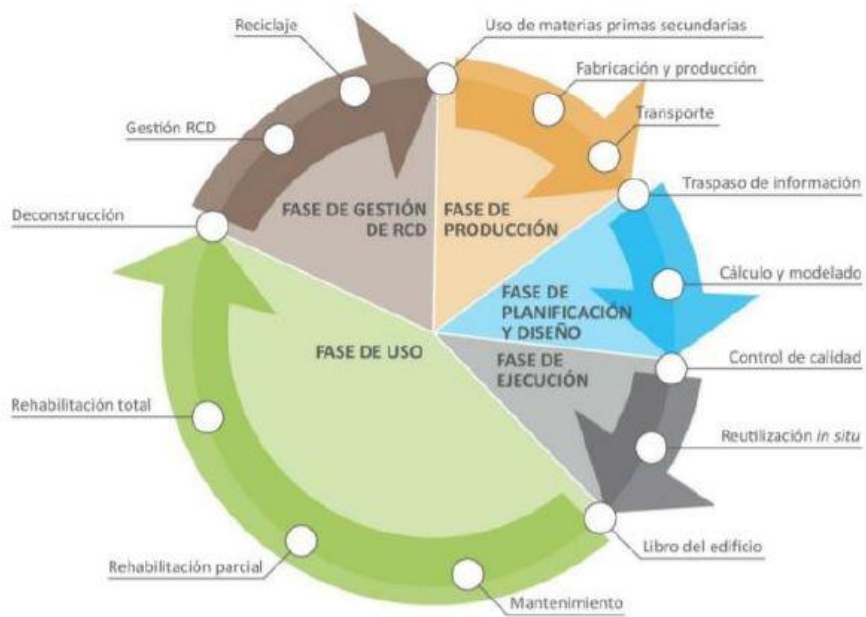
*Ilustración 3.* Esquema de las 9 R. Fuente: GISCI-UPM. Economía circular. Universidad Politécnica de Madrid. <https://blogs.upm.es/gisci/economia-circular/>

Por otro lado, la Fundación Ellen MacArthur propone un diagrama sistémico llamado el “diagrama de mariposa”, que muestra el flujo continuo de materiales técnicos y biológicos. Este concepto, descrito en la *ilustración 4*, detalla cómo estos materiales se pueden reutilizar y regenerar continuamente.



*Ilustración 4. Esquema Diagrama Mariposa. Fuente: Ellen MacArthur Foundation (2020).*

Los beneficios resultantes de la adopción de este sistema son asombrosos tanto para la sociedad como para el medio ambiente. Sin embargo, para alcanzar sus ventajas se requiere de un esfuerzo coordinado y cooperativo por parte de todos los sectores de la sociedad, entre ellos, el **sector de la edificación**.



**Ilustración 5.** EC Fases de la construcción. Fuente: Varios autores (2018), *Economía circular en el sector de la construcción*, Congreso Nacional del Medio Ambiente, CONAMA 2018. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/130254/CONAMA\\_Economia%20circular\\_2018.pdf;sequence=1](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/130254/CONAMA_Economia%20circular_2018.pdf;sequence=1)



### 3. APLICACIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR A LA EDIFICACIÓN.

La construcción desempeña un papel fundamental en nuestra estructura económica y social, y la idea de sostenibilidad en este ámbito abarca una amplia gama de aspectos que van más allá de abordar el cambio climático. Se trata de consideraciones **ambientales** que van desde la conservación de la biodiversidad hasta la promoción de prácticas que respeten el ciclo natural de los recursos y mejoren la gestión del uso del agua, de la energía y de los residuos. Además, abarca aspectos **económicos** como el análisis del coste a lo largo del ciclo de vida de los edificios y consideraciones **sociales**, como la promoción de la integración en áreas urbanas y rurales, garantizar un acceso equitativo a servicios esenciales, y mejorar la calidad de vida y la salud de las comunidades.

El sector de la construcción proporciona infraestructuras, espacios urbanos y edificaciones de los que dependen el resto de los sectores, por lo tanto, es un sector clave para el desarrollo económico y social europeo, que genera 18 millones de empleos directos.

Actualmente, la **Unión Europea** ha percibido la importancia de intensificar sus políticas medioambientales, sociales y económicas en el sector de la construcción. Por ello, ha desarrollado iniciativas, como la Ley Europea del Clima, el Pacto Verde Europeo y el Plan de Acción de Finanzas Sostenibles, junto con el Plan de Recuperación y la Ola Renovadora, con el fin de implementar estrategias para mejorar la sostenibilidad en la construcción. Lograr la descarbonización en 2050 es uno de los principales objetivos del Pacto Verde Europeo adoptado a finales del 2019. La implantación de la economía circular será clave para lograr una Europa descarbonizada.

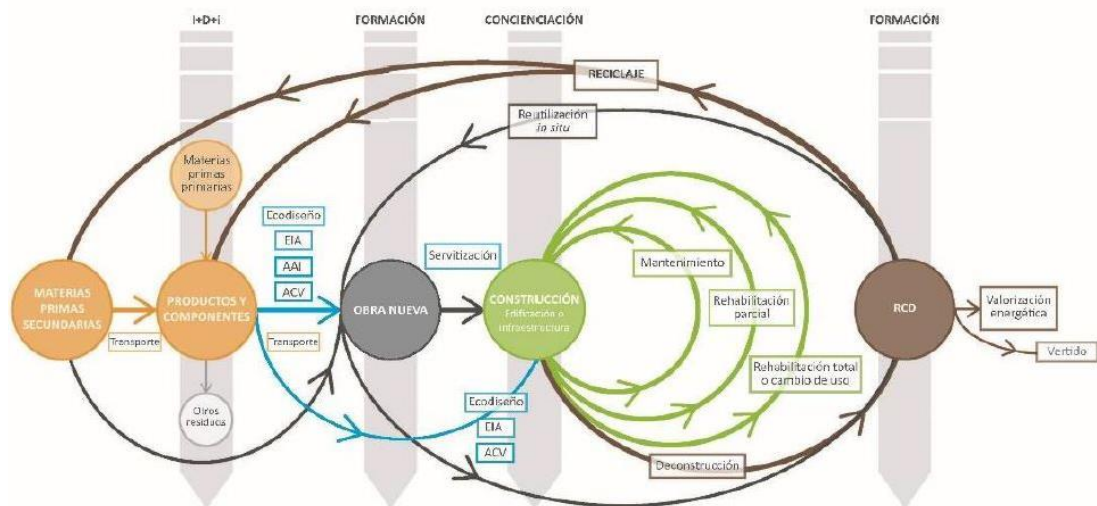
Al mismo tiempo, se tiene en cuenta cierta normativa de referencia a nivel europeo. Entre ellas, se encuentra la **Directiva 2010/31/UE** normativa que establece requisitos para mejorar el rendimiento energético de los edificios dentro de la Unión Europea. Su objetivo principal es reducir el consumo de energía en el sector de la edificación y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

A nivel nacional, se encuentra EL Código Técnico de la Edificación, Reglamentos Técnicos de Instalaciones, Calificación y certificación de eficiencia energética de los edificios y el Plan de Ahorro y la Eficiencia Energética 2011-2020.

Para tomar decisiones y respaldar argumentos de manera efectiva, es esencial contar con información precisa y objetiva. Para evaluar si un edificio es más sostenible que uno convencional, se necesita un conjunto de criterios bien definidos que nos permitan medir esa mejora de manera consistente. Por ello, se hará uso de una serie de herramientas que nos permitirán medir y comparar de forma cuantitativa y verificable el comportamiento ambiental de los edificios y los materiales, y la circularidad en este sector. Entre ellas, cabe mencionar el **ACV** Y Las Declaraciones Ambientales de Producto (**DAP**).

Además, se utilizará el marco **Level(s)** para evaluar la sostenibilidad de los edificios.

El sector de la construcción tiene un gran impacto ambiental debido al consumo de materias primas, recursos energéticos y agua, así como a la generación de residuos. La Economía Circular (EC), es una nueva metodología que puede mejorar significativamente la sostenibilidad de este sector.



**Ilustración 6.** Esquema De Economía Circular en la construcción. Fuente: Varios autores. Economía circular en el sector de la construcción. Grupo de trabajo GT-6 Congreso Nacional del Medioambiente, CONAMA 2018. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/130254/CONAMA\\_Economia%20circular\\_2018.pdf;sequence=1](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/130254/CONAMA_Economia%20circular_2018.pdf;sequence=1)

Para lograrlo, es preciso reducir la cantidad de materias primas, agua y energía necesaria para satisfacer las necesidades requeridas en cada momento, y priorizar el uso de energía y materias primas renovables y secundarias.

Al mismo tiempo, es necesaria una gestión eficaz de los recursos que se utilizan. El objetivo es mantener los recursos materiales en uso el máximo tiempo posible y recircularlos en la cadena de valor el mayor número de veces mediante la reutilización y el reciclaje. La valorización energética siempre debe ser la última opción y el vertedero no se contempla en el marco teórico de la EC.



En la Unión Europea, los edificios son los responsables del 40% de la demanda de energía primaria, 60% de la demanda de electricidad, 40% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, 30% de los residuos generados y del 20% del consumo de agua potable. Con la aparición del concepto de Economía Circular (EC), se permitirá conseguir grandes beneficios medioambientales fundamentalmente en el sector de la construcción, desarrollando nuevas tecnologías más eficientes.

Consistirá en una herramienta innovadora para promover la sostenibilidad en este sector.

Gracias a la aplicación de la EC en los edificios, se logrará la reducción significativa del consumo materias primas, un uso de recursos hídricos y energéticos de forma eficiente a lo largo de todo el ciclo de vida del edificio, la eliminación de residuos, así como la minimización del consumo de recursos naturales no renovables.

Por otro lado, la construcción de edificios altamente eficientes desde el punto de vista energético, junto con la implementación de sistemas de energía renovable locales, nos ayuda a alcanzar con éxito el reto de la transición energética y la sostenibilidad para 2030 en la UE. Esto se evidencia claramente en los edificios de consumo de energía casi nulo (**nZEB**), donde se enfatiza la eficiencia energética y la minimización de la dependencia de fuentes de energía no renovable.

Durante las distintas etapas de vida de los edificios (**ACV**), se consume una cantidad significativa de recursos naturales, tanto agua como energía. Al adoptar estrategias de la EC, se pueden lograr grandes ahorros de recursos naturales y económicos, minimizando los posibles impactos ambientales asociados.

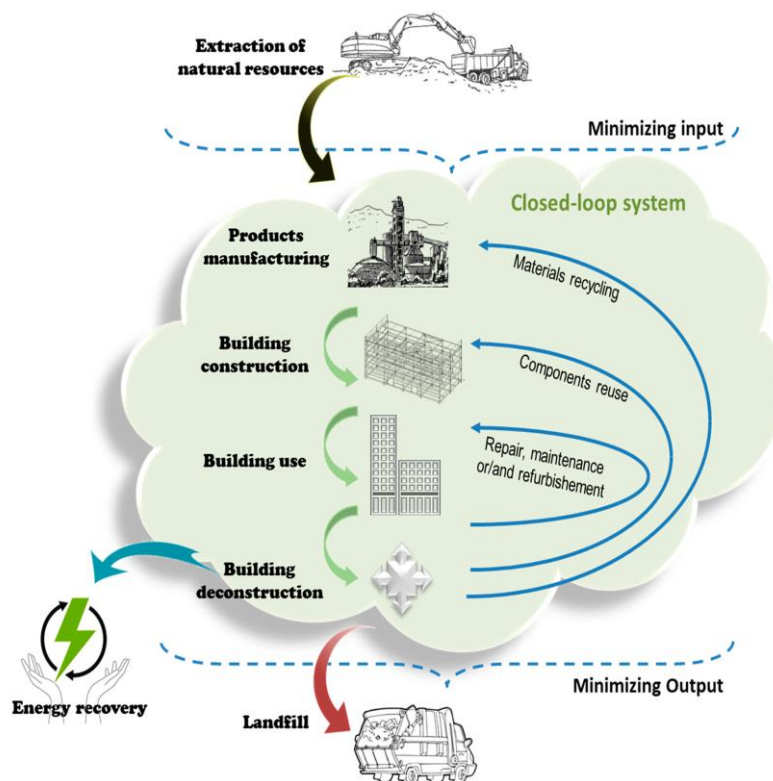
Los edificios circulares aspiran a ser sistemas de circuito cerrado en los que los recursos y materiales se utilicen de manera óptima a lo largo de su ciclo de vida. De acuerdo con **Pomponi y Moncaster**, estos edificios integran estrategias de sostenibilidad con el objetivo de minimizar la huella ambiental de los materiales y recursos naturales utilizados en su construcción y operación.

A lo largo del ciclo de vida de un edificio, la energía se utiliza y consume significativamente, desde la extracción y procesamiento de materiales hasta las fases de construcción, operación y demolición. Los edificios de consumo de energía casi nulo (**nZEB**), que son altamente eficientes energéticamente y adoptan el enfoque de construcción circular, tienen el potencial de alcanzar la neutralidad energética e incluso generar un excedente de energía mediante el diseño e integración de sistemas de energía renovable in situ. En el ACV, la mayor parte del consumo de energía de estos edificios se atribuye a la fase de uso, con las operaciones diarias siendo el factor más significativo.

En el ACV de la construcción, todos los involucrados en el proceso consumen y utilizan agua de manera significativa. Al igual que con el consumo de energía, los usuarios del edificio consumen más agua durante la fase de operación. La Fundación para la Investigación y Desarrollo Agrícola, FIDAR y colaboradores investigaron el uso de componentes eficientes en el uso del agua para reducir el consumo en edificios residenciales, y encontraron una relación lineal entre el consumo de agua y el uso de energía. El diseño del edificio también debe adaptarse al contexto de su ubicación para lograr una mayor eficiencia en el uso del agua. La eficiencia hídrica en edificios circulares puede lograrse durante la fase de operación mediante la recolección de agua de lluvia y la reutilización de aguas grises.

A pesar de que la estrategia de CE en edificios implica un enfoque integral, sin embargo, la gestión de los residuos provenientes de los recursos hídricos y energéticos en la operación, que es la etapa de mayor consumo del edificio, alcanza un aspecto muy relevante.

El diseño de edificios circulares debe priorizar la eficiencia energética y el uso responsable del agua durante su funcionamiento. Esto implica seguir los principios de la EC para crear edificios altamente eficientes en energía y minimizar el consumo de agua mediante la implementación de sistemas de recogida y reutilización del agua de lluvia y aguas residuales.



*Ilustración 7. Ciclos de materia y energía en las fases de construcción de los edificios. Rahla, K. M., Mateus, R., & Bragança, L. (2021, 7 de abril). Implementing Circular Economy Strategies in Buildings - From Theory to Practice. Applied System Innovation, 4(2), 26. <https://doi.org/10.3390/asi4020026>*

La presente investigación estudiará un edificio **nZEB** existente bajo el enfoque CE. Se describirá el funcionamiento actual del edificio y se analizará la gestión de los recursos materiales, hídricos y energéticos durante su etapa de operación. El estudio se realiza mediante el seguimiento del uso y consumo de recursos en la fase operativa, proporcionando una mejora de los recursos del edificio, buscando nuevas estrategias CE que se puedan aplicar a los edificios nZEB.



#### 4. CASO DE ESTUDIO; EDIFICIO NZEB (LUCÍA).

El presente documento analiza el caso de un edificio nZEB conocido como “LUCIA”. Esta construcción se encuentra en el Campus Miguel Delibes, perteneciente a la Universidad de Valladolid, en Valladolid, (continental) España (Figura 1). El edificio tiene una superficie total de 7.500 m<sup>2</sup> y está certificado como Edificio de Energía Casi Nulo, nZEB, siendo un referente mundial en eficiencia energética y arquitectura sostenible. Está compuesto principalmente por laboratorios y áreas de investigación I+D. El edificio está ocupado de 8 a 22 horas de lunes a viernes. La inversión final realizada ha sido 8.225.000 € (IVA incluido), financiada por la Junta de Castilla y León y Fondo Europeo de Desarrollo Regional.



Ilustración 8. Edificio LUCIA



Ilustración 9. Edificio LUCIA

El edificio LUCÍA, como se muestra en la figura 2, ha sido planificado a través de un **diseño bioclimático**. Esto implica la integración de estrategias para reducir el consumo de energía en su construcción, en el uso y en la contaminación generada por ambos procesos. Para ello, se incorporan **sistemas pasivos** y **sistemas activos**.

Entre los **sistemas pasivos**, se encuentra la orientación de ventanas hacia el sur para aprovechar la radiación solar en invierno, así como la incorporación de elementos de sombra para controlar la exposición al sol durante el verano. Este **efecto de auto-sombra**, según las simulaciones realizadas, reduce la demanda de refrigeración en un 54% sin limitar la iluminación natural.

Por otro lado, la vegetación en la cubierta y el aparcamiento abierto con pavimento filtrante o permeable reducen el efecto de isla de calor y contribuyen a crear un **microclima** favorable.

Las paredes internas del edificio están **aisladas**, con una baja transmitancia térmica de 0,157 W/m<sup>2</sup>·K, lo que ayuda a mitigar los cambios de temperatura externos y a mantener un ambiente interior confortable y eficiente en términos energéticos.

Para minimizar el impacto ambiental durante el ciclo de vida del edificio, está construido con **materiales** certificados con bajas emisiones de carbono.

Destacar que la producción de energía eléctrica en el edificio LUCIA nZEB proviene de los **sistemas fotovoltaicos (NOx)** situados en las paredes y el techo. El empleo de **pozos de luz**, permiten ampliar la iluminación natural en el interior y suponen una reducción en torno al 50% de la demanda energética.

Por otro lado, en relación a los sistemas activos, mencionar el empleo de los paneles solares de la cubierta, colocados en la parte superior de las dos escaleras del edificio, actuando como lucernarios. Además de la generación fotovoltaica, se ha implementado un sistema de **district heating** que funciona con **biomasa**, contribuyendo a la producción de energía térmica para sistemas de calefacción, y refrigeración por absorción, lo que demuestra un enfoque integrado y eficiente en la gestión de la energía en el edificio.

El ciclo de absorción suministra refrigeración al edificio con una eficiencia energética (EER) de 0,7 y una potencia de 176 kW. Como respaldo, el edificio cuenta con un **sistema de refrigeración** por aire convencional adicional con una potencia de 232,7 kW y un EER de 3,3.

Para disipar el calor residual generado por el sistema de absorción, se utiliza una **torre de refrigeración**. Presenta una capacidad de flujo de aire de hasta 15.000 m<sup>3</sup>/h, que puede ser constante o variable, que podrá cambiar en función de la temporada. Esto permite adaptar la refrigeración del edificio a las condiciones climáticas cambiantes y a los requerimientos de confort de los ocupantes.

Además, cuenta con un Intercambiador **de Calor Tierra-Aire (EAHE)** y tecnologías de recuperación de calor (**HVAC**) para minimizar las demandas de ventilación.

Se favorece la iluminación natural mediante el uso de **lucernarios tubulares**. Mediante el empleo del **Sistema Dali**, se controla la iluminación a partir del uso de luces de alta eficiencia junto con regulación y control de ocupación. Este sistema, supone un ahorro de 6,33kW/m<sup>2</sup>año y la reducción de emisiones de 4,11 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.

El edificio está bajo seguimiento y control continuo de los diferentes parámetros energéticos de la caldera, el sistema de climatización, la unidad de absorción y el agua caliente sanitaria. A través del protocolo **ModBus**, se monitoriza mediante el empleo de contadores de impulsos, el consumo energético de calefacción, ventilación y aire acondicionado.

SISTEMAS PASIVOS	SISTEMAS ACTIVOS
Diseño compacto	Utilización de energías renovables: combustibles de bajas emisiones (biomasa), placas solares fotovoltaicas, energía geotérmica (empleo de tubos o pozos canadienses en apoyo del sistema de ventilación mecánica).
Orientación de ventanas: optimización de la luz natural	Recogida y reutilización del agua de pluviales, redes separativas, aparatos sanitarios de bajo consumo.
Control de soleamiento con parasoles.	Lucernarios fotovoltaicos
Cerramiento ciego norte (minimizar pérdidas térmicas), apertura máxima al sol (ganancias térmicas solares). Efecto auto-sombra. Minimiza 54% demandas refrigeración.	Muro fotovoltaico (doble piel)
Vegetación en cubierta	
Vegetación aparcamiento	
Pavimento aparcamiento permeable	
Gran aislamiento térmico ( $U=0.157 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ), eliminando puentes térmicos, y con carpinterías de alto aislamiento y vidrio de baja emisividad y transmitancia cercana a $U=1.40 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ para un mayor control térmico con el objetivo de reducir el consumo de calefacción y electricidad.	
Reducción del coste energético y de las emisiones en la fase de construcción, favoreciendo la utilización de materiales de baja energía de producción y/o con certificados de bajas emisiones en su fabricación. Incluso con el uso de materiales reciclados y elementos constructivos reutilizados, reduciendo en todo lo posible los residuos generados por el proceso de construcción. RECSO.	
Empleo de sistemas fotocatalíticos (NOx).	
Solatubes	
Iluminación natural (lucernarios)	
Sistemas de pozos canadienses (geotermia)	
Cámara de aire doble piel muro cortina	
Ventilación nocturna, renovación de aire y enfriamiento por ventilación natural.	

**Tabla 1.** Resumen estrategias diseño. Fuente: Elaboración propia a partir de Departamento de Arquitectura de la UVA.



Las estrategias bioclimáticas mostradas en la tabla 1, junto con el empleo de equipos eficientes, permiten una fuerte reducción de la demanda energética. Se consiguen reducciones energéticas, desde 245 kWh/m<sup>2</sup>año, a una demanda de 65,90 kWh/m<sup>2</sup>año, lo que supone una reducción energética de 73,103%. De esta forma, la demanda total del edificio (incluidos ventilación, climatización, servicios eléctricos e iluminación), queda satisfecha con energías renovables, con lo que el edificio no produce prácticamente emisiones de CO<sub>2</sub>.

LUCIA es reconocido como uno de los edificios nZEB líderes y emblemáticos de todo el mundo, con la segunda puntuación **LEED PLATINUM** más alta a nivel mundial (98 puntos), sólo superado por el edificio PIXEL en Australia. Este resultado, ha supuesto un éxito significativo en el sector de la construcción sostenible en España y Europa, siendo un gran referente para futuros proyectos.



Ilustración 10. Niveles de Certificación LEED

Las diferentes estrategias empleadas en la construcción, han permitido obtener la certificación correspondiente.



Ilustración 11. Categorías Certificación LEED

El objetivo de este estudio se centrará en el estudio de los **materiales** empleados durante la fase de construcción y en analizar dos procesos muy relevantes en la fase de operación del edificio nZEB, como son la gestión del **agua** del edificio y la gestión de la **energía** de recuperación térmica en el proceso de ventilación para conseguir una adecuada IAQ. Ambos procesos están directamente relacionados dentro de la CE del edificio, en la etapa de operación de procesos residuales para la recuperación de recursos naturales de agua y energía térmica.

## 5. APLICACIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR AL EDIFICIO (NZEB).

**LEVEL(s)** es una iniciativa europea que está transformando el paradigma de la construcción hacia la economía circular y la sostenibilidad ambiental. Este marco común proporciona herramientas y directrices para diseñar y construir edificios con un bajo impacto ambiental en Europa.

En respuesta a la exigencia del Acuerdo de París de que el sector de la construcción y la edificación se descarbonice de aquí a 2050, LEVEL(s) apoya la evaluación esencial a lo largo de todo el ciclo de vida: diseño, construcción, uso y final de la vida útil. Proporciona un lenguaje común sobre el rendimiento de sostenibilidad en los edificios.

Como solución para identificar los puntos críticos de sostenibilidad y preparación de un proyecto, se basa en **seis macroobjetivos**, los cuales se pueden medir y rastrear a través de **dieciséis indicadores**. Dichos indicadores, asociados a cada macroobjetivo describen cómo el rendimiento de los edificios puede alinearse con los objetivos estratégicos de la política de la UE en áreas como la energía, el uso de materiales y residuos, agua, calidad del aire, diseño de interiores y resiliencia al cambio climático. LEVEL(s) se basa en tres niveles que funcionan de manera complementaria para promover la sostenibilidad en la construcción.

Este enfoque es fundamental en un momento en el que el sector de la construcción es uno de los mayores consumidores de recursos en Europa. Al promover un sistema económico regenerativo y la minimización del consumo de recursos y energía, LEVEL(s) contribuye significativamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible y a la construcción de un futuro más sostenible para todos.

En resumen, con un número reducido de indicadores, LEVEL(s) nos ayuda a:

- Un acceso sencillo a la circularidad y una perspectiva del ciclo de Vida.
- Identificar puntos críticos para ser más sostenibles.
- Definir los objetivos de sostenibilidad en las reuniones iniciales de un proyecto junto a los agentes implicados.
- Orientar los esfuerzos de diseñadores y clientes para cumplir mejores políticas europeas.
- Demostrar cómo se pueden alinear las iniciativas políticas con un marco europeo que ha sido probado por un gran número de profesionales de la construcción de toda la UE.



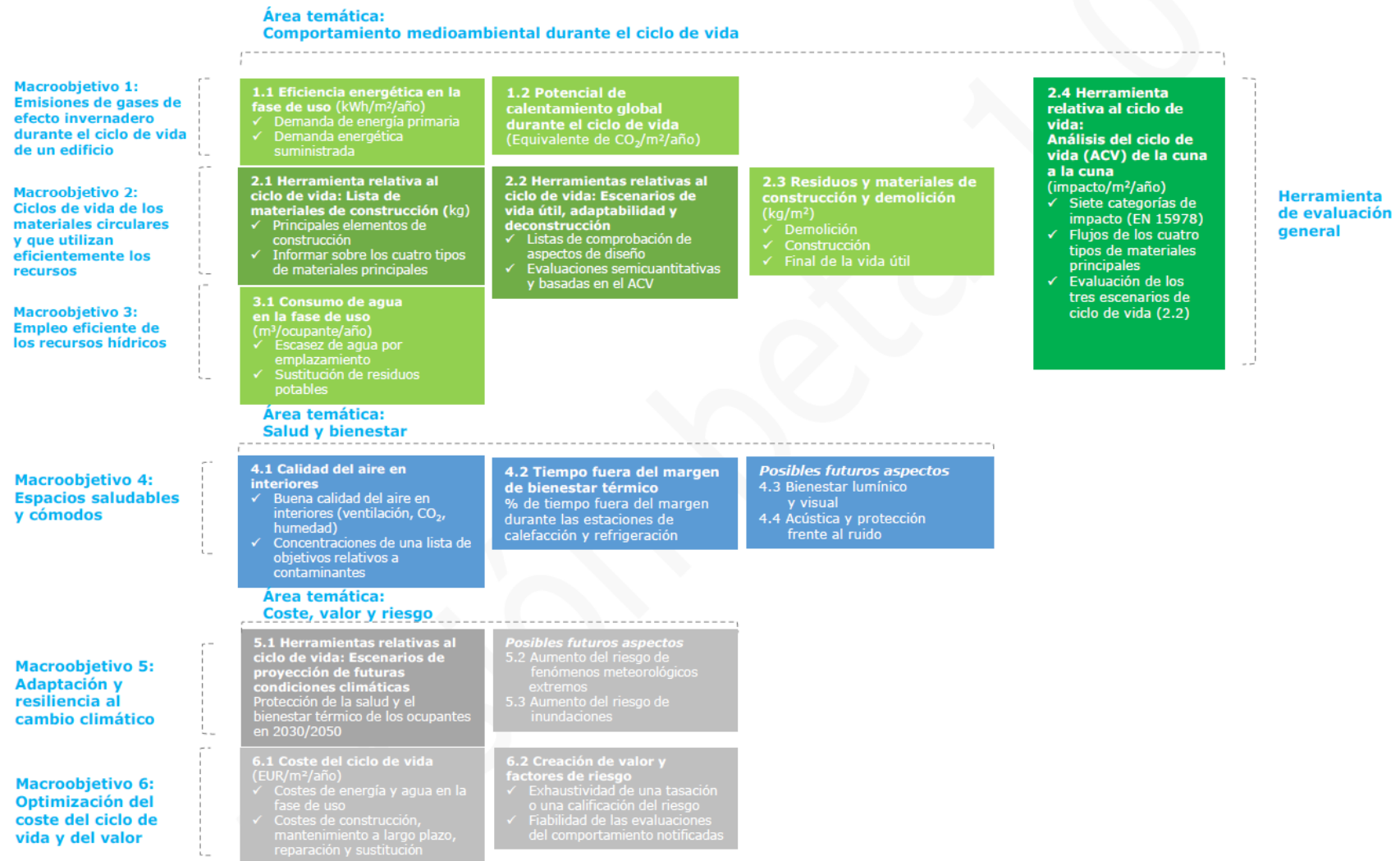


Ilustración 12. LEVELS DE LA UE. Fuente: Instituto de Tecnología de la Construcción.

En este estudio, siguiendo los macroobjetivos mostrados en la ilustración 12, usaremos dos, el número 1 y el número 3 con sus indicadores correspondientes.



## 5.1. RECURSOS:

### 5.1.1. MATERIALES Y SU RECICLAJE.

Todos los materiales utilizados en la construcción del LUCIA siguen las especificaciones, estándares y requisitos de certificación LEED, promoviendo la economía circular.

La construcción sostenible, busca una gestión integral de los recursos y una selección cuidadosa de materiales para promover la sostenibilidad ambiental en todas las etapas del proyecto. Esto garantiza el uso de materiales **regionales**, apoyando así el uso de recursos locales, reduciendo los impactos ambientales derivados del transporte. Los productos empleados en la construcción del edificio caso de estudio, han sido extraídos, cosechados, recuperados y/o fabricados, a un máximo de 800 kilómetros del Proyecto.

Para justificar y garantizar el compromiso con la sostenibilidad, se llevan a cabo una serie de estrategias. Entre ellas, se trata de aumentar la demanda de productos que incorporan materiales con baja energía incorporada y de materiales con contenido **reciclado**. De esta forma, se reduce el impacto ambiental resultantes de la extracción y procesamiento de materias primas, se promueve la economía local y se fomentan prácticas responsables de gestión de recursos. El equipo de proyecto, destinó entre el 10% y el 20% del costo total del proyecto para aquellos de contenido reciclado.

Para justificar que el edificio caso de estudio es un modelo de sostenibilidad, se ha tenido en cuenta el Impacto ambiental detallado en la declaración **DAP** de los Materiales, residuos generados en la fase de construcción y la posible reutilización en la desconstrucción o fin de vida.

La DAP es una herramienta crucial para evaluar y comunicar la huella ambiental de los productos. Se trata de documentos estandarizados que proporcionan información cuantificada sobre el ciclo de vida ambiental de un producto, desde la extracción de materias primas hasta su fin de vida.

El edificio ha sido concebido de forma que una gran parte de las unidades de obra que lo componen puedan ser desmontadas y **reutilizadas** al final de la vida útil del edificio, al tratarse de elementos montados en vía seca. Además, se garantiza que los residuos generados durante la construcción y demolición sean desviados de los vertederos y las instalaciones de incineración. Los materiales reciclables serán enviados de vuelta al proceso de fabricación, mientras que los materiales reutilizables serán dirigidos a sitios adecuados. El proyecto tiene como objetivo principal reciclar al menos el 50% de todos los residuos de construcción y demolición, con una aspiración secundaria de alcanzar una tasa de reciclaje del 75%.

Por otro lado, se hace uso de materiales **fotocatalíticos**, es decir, capaces de transformar ciertos contaminantes atmosféricos en otros y eliminándolos del aire. Por ello, se puede citar el uso de baldosas fotocatalíticas en el exterior del edificio (elementos de revestimiento en volúmenes de cubierta, intradós, etc.).

Por otro lado, en relación a los sistemas de acabados, barnices, pinturas y revestimientos finales, se hace uso de materiales de recubrimiento de bajo contenido en elementos tóxicos volátiles **VOC** (componentes orgánicos volátiles) de acuerdo con la DAP (declaración ambiental del producto) aportados por sus fabricantes. En la fachada cabe citar el empleo de paneles prefabricados de hormigón, los cuales han recibido un acabado con pintura fotocatalítica.

Cabe destacar, para la construcción del edificio LUCIA, el empleo de materiales sostenibles, tales como el corcho aglomerado 100% natural, que cumple la función de aislante térmico y acústico.

Las **cubiertas** planas se apoyan en elementos simples y confían en el peso de los materiales empleados, para su estabilidad. Para proteger los componentes y garantizar su durabilidad, se colocan láminas geotextiles de diferentes grosores. Estas láminas actúan como barrera protectora al tener la función de prevenir contactos no deseados, que puedan causar degradación de los materiales del sistema.

Por otro lado, es esencial asegurar que los geotextiles estén en su lugar y cumplan su función de protección para garantizar el rendimiento óptimo del sistema a lo largo del tiempo.

Llegados al final de la vida útil del edificio y habiendo conservado y mantenido este elemento son recuperables los siguientes materiales:

- 100% cobertura de tierra vegetal.
- 100% losa filtrón en las zonas de paso.
- 100% aislamiento de XPS.
- 100% lámina extendida de PVC.

Las **fachadas** del edificio tienen secciones ciegas y acristaladas, hechas de paneles prefabricados de hormigón, anclados a los forjados. Estos paneles están diseñados con hormigón de alta resistencia a la intemperie (cemento), lo que permite su desmontaje y reubicación para su reutilización.

Los paneles de las fachadas están contruidos con perfiles de chapa de acero galvanizado, con aislante de fibra mineral montado entre ellos. Se completan con placas de yeso laminado, las cuales pueden desmontarse, aunque algunas pueden resultar dañadas en el proceso. El aislante puede extraerse por completo del sistema. Para garantizar su buen estado al final de su vida útil, es crucial conservar y mantener las fachadas, especialmente mediante la revisión y reparación de los sellados de juntas para prevenir la entrada de agua al interior.



Las **carpinterías** están hechas de aluminio con un acabado en color. Se instalan sobre un marco y se sujetan con tornillos en varios puntos. Se pueden desmontar fácilmente, en caso de detectar alguna pérdida para repararla. Al llegar al final de la vida útil del edificio, se pueden recuperar los siguientes materiales:

- 80% de los paneles prefabricados de hormigón, teniendo en cuenta posibles roturas debido al tamaño de las piezas.
- 100% de las carpinterías de aluminio y vidrio.
- 100% de los aislamientos de baja conductividad térmica (LMW).
- 50% de los paneles.
- 80% de la perfilería del entramado autoportante.

En relación a los **solados** del edificio, sólo es posible recuperar los suelos de gres porcelánico colocados en vía seca. Para garantizar la recuperabilidad de los materiales y minimizar el impacto ambiental al final de la vida útil del edificio se deberá cumplir las prescripciones del plan de conservación y mantenimiento del edificio. En este caso, son recuperables los siguientes materiales:

- 100% subestructura de plots para elevar el suelo de la planta baja.

Con respecto a los **falsos techos**, sólo es posible recuperar los de placas de yeso y parte de la subestructura que los sujeta. En resumen:

- 50% subestructura de cuelgue de las placas.
- 100% placas registrables

Las **particiones interiores** están construidas con entramados autoportantes de perfiles de chapa de acero galvanizado, aislamiento interior y acabado exterior con placas de yeso laminado o paneles de DM.

Es importante tener en cuenta que la forma en que se fijan estas particiones puede afectar su recuperación al final de la vida útil del edificio. Por ello, se recomienda emplear tornillos desenroscables. Esto, permitirá que las tareas de desmontaje sean más limpias y eficientes, lo que a su vez facilitará la recuperación del mayor porcentaje de material posible. Serán recuperables:

- 80% estructura autoportante.
- 50% placas y tableros.
- 100% aislante intermedio.

La **carpintería interior**, (madera y acero), es gran parte recuperable en sus partes móviles y elementos fijos (vidrios y junquillos). Sin embargo, se debe tener precaución durante el desmontaje de los marcos, pues al estar firmemente clavados a la subestructura es posible que un porcentaje resulte dañado durante el desmontaje. De esta forma, se maximiza la cantidad de material recuperable.

- 100% partes móviles (hojas)
- 100% vidrios y junquillos
- 80% marcos.

Por otro lado, cabe destacar el cemento del tipo PÓRTLAND tipo CEM II/A-V 42.5 R. Con un contenido en ceniza volante mayor al 15% cumple con los estándares LEED MR-4.1 para materiales con contenido reciclado. La ceniza volante es un subproducto de la quema de carbón y puede considerarse un material reciclado ya que se utiliza como adición en la fabricación del cemento.

Además, el lugar de fabricación, extracción y recuperación del cemento se encuentra dentro de un radio menor de 800 km del lugar de construcción, por lo tanto, también cumple con el estándar LEED MR-5.1 para materiales regionales. Esto demuestra un compromiso con la sostenibilidad y la reducción del impacto ambiental en el proyecto de construcción.

Al mismo tiempo, mencionar el empleo del acero corrugado B-500 S, con sello CIETSID y el acero S-275-JR. Estos materiales, cumplen también los estándares LEED MR-4.1 Y MR-5.1. Han sido fabricados a partir de material reciclado, en un porcentaje del 98% y 95% respectivamente, aproximadamente. Dichos materiales, a su vez son reciclables en un 100%.

La siguiente tabla, muestra el conjunto de materiales representativos empleados en la construcción y su estimación de impacto ambiental según documentos y mediciones teniendo en cuenta como referencia la Norma EN15804.

Para evaluar el impacto ambiental, cabe destacar, los kg CO<sub>2</sub> equivalentes/kg, haciendo referencia a la cantidad de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) emitido por cada kilogramo de un determinado producto o material. Esta cifra puede variar según varios factores, como el tipo de producto, el proceso de producción y la fuente de los materiales utilizados en su fabricación.

Medir el impacto ambiental en términos de kg CO<sub>2</sub> equivalentes/kg es una manera de cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción de un material específico y permite tomar decisiones para reducir dichas emisiones y promover prácticas más sostenibles. En general, cuanto menor sean las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas con un material, más sostenible se considera.

## Lista de materiales y estimación de Impacto Ambiental según documentos de mediciones y presupuesto - Norma de referencia EN 15804 Environmental Product Declarations

MATERIALES REPRESENTATIVOS	DAP	Impactos Ambientales detallados en la declaración de DAP de los Materiales.			Residuos generados en la fase de construcción	Uso de materia prima				Posible reutilización en la deconstrucción o fin de vida	Materia prima [kg]
		Base Datos Utilizada	Embodied Energy MJ/kg	kg CO2 eq/kg	Residuos NO Peligrosos [kg/kg]	Cantidad de materiales presupuestados [kg]	% de producción local	% Material reutilizado	% Material reutilizable	% Material reciclable	
Indicar superficie total y los materiales empleados en los principales Elementos Constructivos											
<b>CUBIERTA</b>		<b>2821,75 m<sup>2</sup></b>									
Forjado de prelosas	SI	BEDEC	2,929	0,327	1,00E-03	1228653,67	100,00%			80,00%	1228653,6
Hormigón aligerado pendiente	SI	BEDEC	3,472	0,283	0,017	124730,9	100,00%			100,00%	124730,9
Mortero 1/6 (20 mm)	SI	BEDEC	0,579	0,094	0,001	85726,02	100,00%			100,00%	85726,02
Recrecido mortero 1/6 (60 mm)	SI	BEDEC	0,575	0,107	0,001	91421,51	100,00%			100,00%	91421,51

Geotextil 125gr/m2	SI	BEDEC	87,231	12,846	0,208	258,95					258,95
Lamina impermeabilización PVC	SI	BEDEC	76,779	11,163	0,111	3784,56			100,00%		3784,56
Geotextil 250gr/m2	SI	BEDEC	85,040	12,560	0,164	497,97					497,97
XPS 35 kg/m3	SI	BEDEC	117,000	17,270	0,095	12548,79			100,00%		12548,79
Lámina drenante 140 gr/m2	SI	BEDEC	93,824	13,852	0,148	2671,02					2671,02
Tierra vegetal aportada	SI	BEDEC	0,128	0,010	0,00E+00	142785,59	100,00%	100,00%	100,00%		0
Tierra propia	SI	BEDEC	0,032	0,008	0	577560	100,00%	100,00%	100,00%		0
Losa Filtron	SI	BEDEC	3,323	0,372	0,014	42362,85			100,00%		42362,85
Lucernario fotovoltaico	SI	BEDEC	16,362	0,983	0	7153,38			100,00%		7153,38
Solado granito	SI	BEDEC	0,701	0,116	0,011	22151,48	100,00%			100,00%	22151,48
Membrana impermeabilizante bicapa	SI	BEDEC	45,013	6,561	0,095	4600,99					4600,99
Solado de terrazo	SI	BEDEC	1,866	0,228	0,024	25354,2	100,00%			100,00%	25354,2
FT modular	SI	BEDEC	26,852	1,915	0,064	5172,26			80,00%	20,00%	5172,26
FT continuo + pintura	SI	BEDEC	50,904	6,721	0,097	6278,65				100,00%	6278,65

FORJADOS INTERIORES											
		5442,49 m <sup>2</sup>									
Forjado de prelosas	SI	BEDEC	2,929	0,327	1,00E-03	2419574	100,00%			80,00%	2419574
Suelo técnico elevado	SI	BEDEC	9,07	0,72	0,003	1676,37			100,00%		1676,37
Recrecido mortero 60mm	SI	BEDEC	0,58	0,11	0,001	695244	100,00%			100,00%	695244
Lamina polietileno 0,2 mm	SI	BEDEC	101,69	14,91	6,6	88,84					88,84
Lamina antiimpacto 5 mm	SI	BEDEC	94,50	0,00	0	752,23					752,23
Corcho negro	SI	BEDEC	3,94E+00	2,40E-01	0,155	13729,47				100,00%	13729,47
Gres porcelánico Stonker	SI	BEDEC	1,18E+01	1,32E+00	0,038	108920,82		90,00%		100,00%	10892,082
Gres porcelánico antideslizante	SI	BEDEC	1,18E+01	1,32E+00	0,038	5617,36				100,00%	5617,36
Linoleo	SI	BEDEC	4,62E+01	6,81E+00	0,005	42,21					42,21
FT modular	SI	BEDEC	26,852	1,915	0,064	3587,64			80,00%	20,00%	3587,64
FT continuo + pintura	SI	BEDEC	50,904	6,721	0,097	10747,45				100,00%	10747,45
FT lamas metálicas	SI	BEDEC	161,71	9,278	0,13	309,66			80,00%	100,00%	309,66
Aislante lana de roca	SI	BEDEC	33,319	1,416	0,069	586,34					586,34

<b>MEDIANERAS</b>											
											0
<b>MUROS EXTERIORES</b>											
											0
Panel sandwich hormigón	SI	BEDEC	2,58E+00	2,42E-01	0	442160	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	442160
EPS panel	SI	BEDEC	1,17E+02	1,73E+01	0,175	992,98	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	992,98
Aislamiento madera natural	SI	sin ref	3,10	0,00	0	11033,12	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	11033,12
Trasdosado autoportante 76/400(46)-2STD	SI	BEDEC	11,19	0,81	0,036	49916,42	0,00%	0,00%	80,00%	20,00%	49916,42
Pintura plástica	SI	BEDEC	4,03E+01	5,95E+00	0,053	1132,41	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1132,41
Placa de aluminio onde pequeña	SI	BEDEC	2,20E+02	3,23E+01	0	1660,79	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	1660,79
Enfoscado M-5 10mm	SI	BEDEC	5,72E-01	1,06E-01	0,073	25939,79	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	25939,79
1/2 pie LP	SI	BEDEC	1,92E+00	1,66E-01	0,045	34100,02	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	34100,02
LMV 65 mm	SI	BEDEC	2,23E+01	1,42E+00	0,069	624,68	0,00%	0,00%	80,00%	0,00%	624,68
1 pie LP	SI	BEDEC	2,268	0,205	0,005	89166,53	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	89166,53
											0

PARTICIONES INTERIORES											
		5913,86 m <sup>2</sup>									
Revestimiento continuo liso imp	SI	BEDEC	3,82E+01	5,64E+00	0,513	224,43		0,00%	0,00%		224,43
Bloque de hormigón 40x20x20	SI	BEDEC	2,19E+00	2,21E-01	0,047	142282,49	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	142282,49
1/2 pie LP	SI	BEDEC	1,92E+00	1,66E-01	0,045	64009,58	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	64009,58
Enfoscado M-5 10mm	SI	BEDEC	5,72E-01	1,06E-01	0,073	28164,36	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	28164,36
Pintura plástica	SI	BEDEC	4,03E+01	5,95E+00	0,053	4717,99	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	4717,99
Trasdosado aut. 76/400(46)-2STD_MW	SI	BEDEC	1,17E+01	8,40E-01	0,038	8656,54	0,00%	0,00%	80,00%	20,00%	8656,54
Trasdosado aut. 61/400(46)-1H	SI	BEDEC	1,45E+01	1,12E+00	0,033	4738,87	0,00%	0,00%	80,00%	20,00%	4738,87
Tabique PYL 130/400(70)-2STD-2STD_MW	SI	BEDEC	9,74E+03	6,61E-01	0,041	150037,06	0,00%	0,00%	80,00%	20,00%	150037,06
Tabique PYL 130/400(70)-2F-2F_MW	SI	BEDEC	9,62E+00	6,50E-01	0,041	60020,9	0,00%	0,00%	80,00%	20,00%	60020,9
Tabique PYL 115/400(70)-2STD-1H_MW	SI	BEDEC	1,22E+01	8,77E-01	0,053	14387,92	0,00%	0,00%	80,00%	20,00%	14387,92
	SI	BEDEC	6,28E+00	3,59E-01	0,011	5394,88	0,00%	0,00%	80,00%	20,00%	5394,88

Tabique PYL 100/400(70)-1H-1H_MW	SI	BEDEC	12,276	0,882	0,042	1659,66	0,00%	0,00%	80,00%	20,00%	1659,66
Alicatado	SI	BEDEC	11,508	1,226	0,123	17835,42	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	17835,42
Revestimiento DM	SI	BEDEC	1,56E+01	1,40E+00	0	1727,93	0,00%	0,00%	80,00%	20,00%	1727,93
Mampara de vidrio	SI	BEDEC	37,779	2,2	0	13321,98	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	13321,98
Mampara madera	SI	BEDEC	14	0,83	0,004	1952,1	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	1952,1
<b>SUELOS</b>			1339,5 m <sup>2</sup>								
Pavimento hormigón	SI	BEDEC	3,02E+00	2,14E-01	0	243038,88	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	243038,88
Geotextil 200gr/m <sup>2</sup>	SI	BEDEC	8,50E+01	1,26E+01	0,164	334,88	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	334,88
Solera hormigón HA-25 bombeado 20c cm	SI	BEDEC	5,53E-01	1,00E-01	0	667124,58	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	667124,58
Lámina polietileno	SI	BEDEC	1,02E+02	1,49E+01	6,6	70,99	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	70,99
Encachado de piedra	SI	BEDEC	0,1	0,007	0	322082,78	100,00%	100,00%	100,00%	0,00%	0
<b>Fachada:</b>			m <sup>2</sup>	% de huecos en la fachada	% de huecos en la fachada	m <sup>2</sup>		% de huecos en la fachada			
<b>HUECOS</b>		<b>Norte</b>	19,57	0-10%	51-60%	<b>Sureste/Suroeste</b>					
Doble acristalamiento 6+16+44.1	SI	BEDEC	17,41	1,089	0	33892,07	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	33892,07



Carpintería aluminio RPT	SI	BEDEC	192,757	28,35	0	13315,73	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	13315,73
Muro cortina fotovoltaico	SI	BEDEC	161,412	9,259	0,048	394,44	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	394,44
Vidrio muro cortina	SI	BEDEC	17	1,06	0	9073,85	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	9073,85
<b>CIMENTACIÓN</b>		Muro de contención	632,75 m <sup>2</sup>	Zapatas y zanjas	256,74						
Impermeabilización	SI	BEDEC	40,97	5,96	0,068	1006,4	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1006,4
<b>ESTRUCTURA (Si procede. Ver Manual del Evaluador Acreditado criterio C8)</b>											
<b>Estructura de Referencia</b>											
											0
<b>Estructura Objeto</b>											
											0
<b>Total Absoluto</b>			1,49E+09	2,957E+06	4,70E+04	8,11,E+06	7,E+06	1,E+06	1414842,646	5948438,612	6969,319122
<b>Total Absoluto por m2</b>			198319,9577	394,3080297	6,27347035	1081,581895	998,0778917	152,0812252	188,6708422	793,2309124	0,929366465
<b>Total Relativo [%]</b>						100,00%	92,28%	14,06%	17,44%	73,34%	0,09%

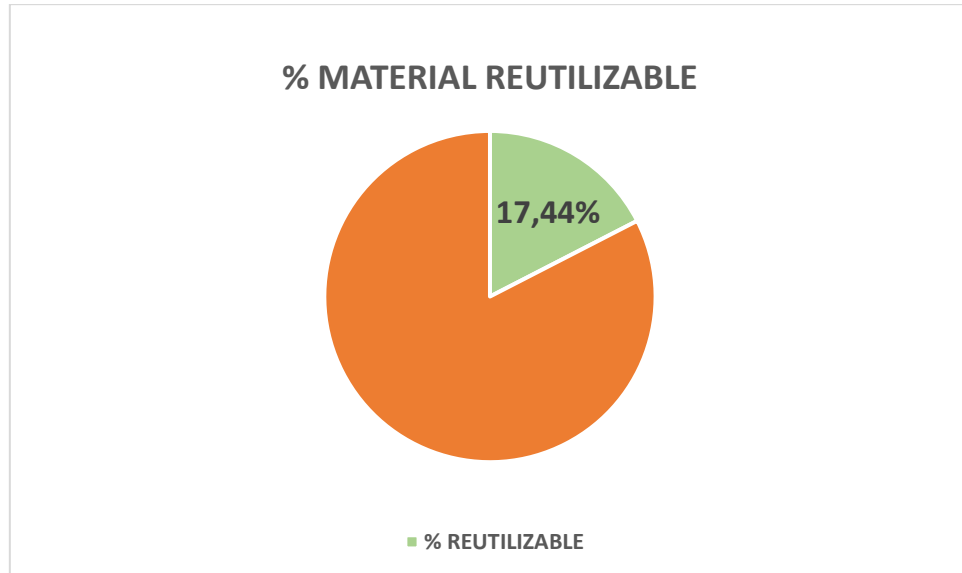
Tabla 2. EDP materiales. Fuente: Departamento Arquitectura de la UVA.



Teniendo en cuenta los porcentajes individuales de reciclaje y reutilización de los principales materiales de construcción junto con la cantidad (kg) de cada uno empleado, se puede calcular un porcentaje global que represente la cantidad total de materiales reutilizables en el edificio al final de su vida útil. Los gráficos adjuntos muestran visualmente esta información.

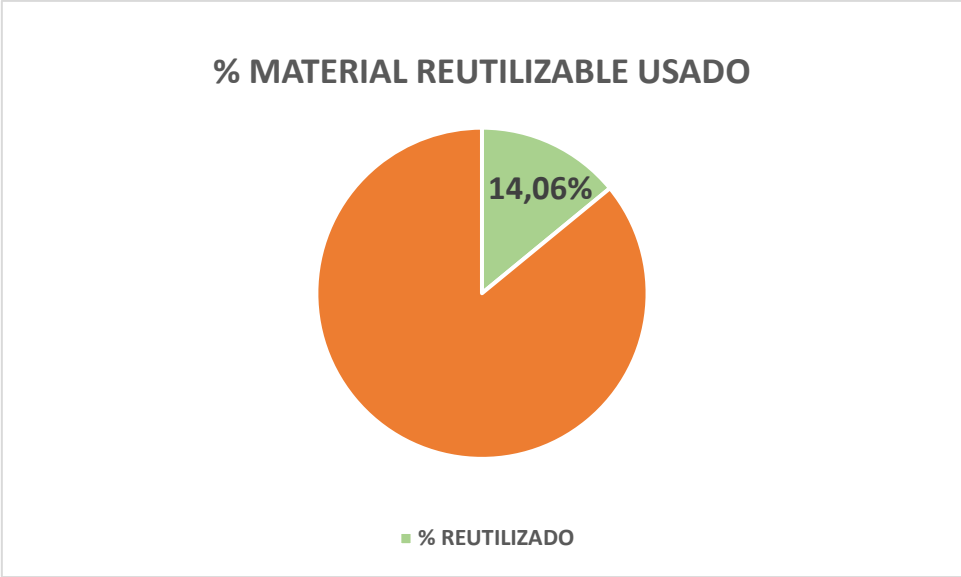


**Gráfico 1.** %Total de materiales reciclados. Fuente: Elaboración propia



**Gráfico 2.** % Total materiales reutilizables. Fuente: Elaboración propia.

Al mismo tiempo, se proporciona una visión global de los materiales reutilizables empleados en la construcción del edificio. Esto se presenta claramente en el gráfico adjunto.



**Gráfico 3.** Porcentaje total material reutilizable usado en la construcción. Fuente: Elaboración propia.

### 5.1.2. RECURSOS ENERGÉTICOS/GESTIÓN ENERGÉTICA: AHORRO DE ENERGÍAS Y ENERGÍAS RENOVABLES.

El objetivo del ahorro energético, es lograr un uso eficiente de la energía requerida para la construcción, uso y funcionamiento del edificio LUCIA, reduciendo su consumo a niveles sostenibles y responsables, y fomentando la utilización de fuentes de energía renovable. De esta forma se minimiza el gasto energético.

Sin embargo, para alcanzar este propósito, se garantizará que se cumplan con los estándares y regulaciones exigidas y necesarias para promover la eficiencia energética y el uso de fuentes renovables.

En línea con el principal objetivo del edificio LUCIA, se enfoca en reducir la demanda energética mediante medidas constructivas innovadoras, a través de mejoras en el diseño, que permitan optimizar el uso de energía y promover la sostenibilidad en el funcionamiento del edificio.

En lo que respecta a los sistemas energéticos, se han integrado pozos canadienses para respaldar los sistemas de ventilación mecánica mediante geotermia. Además, se implementa la recuperación de calor en la ventilación mecánica y se aprovecha la energía renovable mediante la producción calor a partir de una caldera de vapor alimentada con biomasa.

Un edificio que ha obtenido la certificación LEED logra reducir sus gastos de energía entre el 20% y 60% en comparación con un edificio convencional. Sin embargo, el edificio LUCIA supera este estándar al lograr un ahorro energético que excede el 70% respecto al edificio de referencia, lo que se traduce en costos notablemente reducidos.

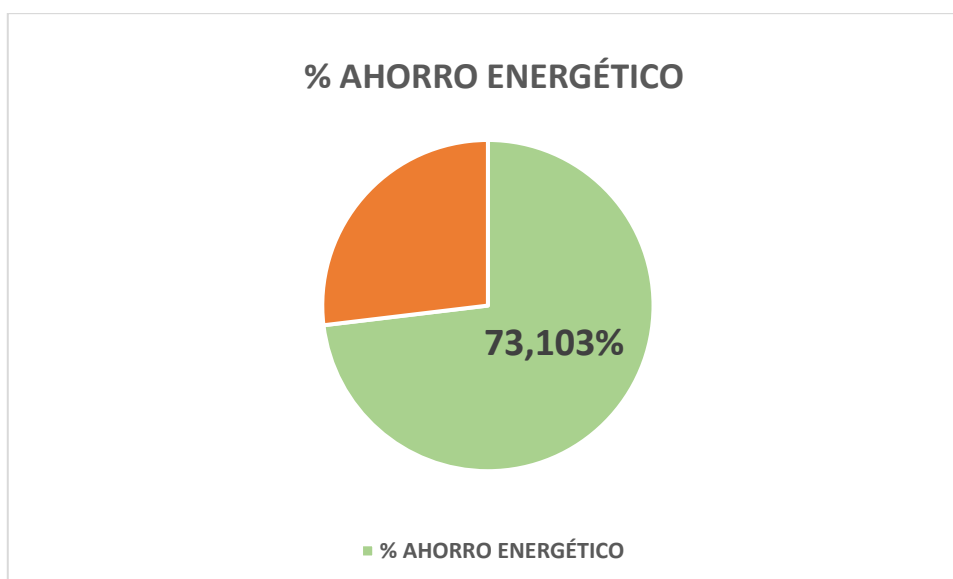
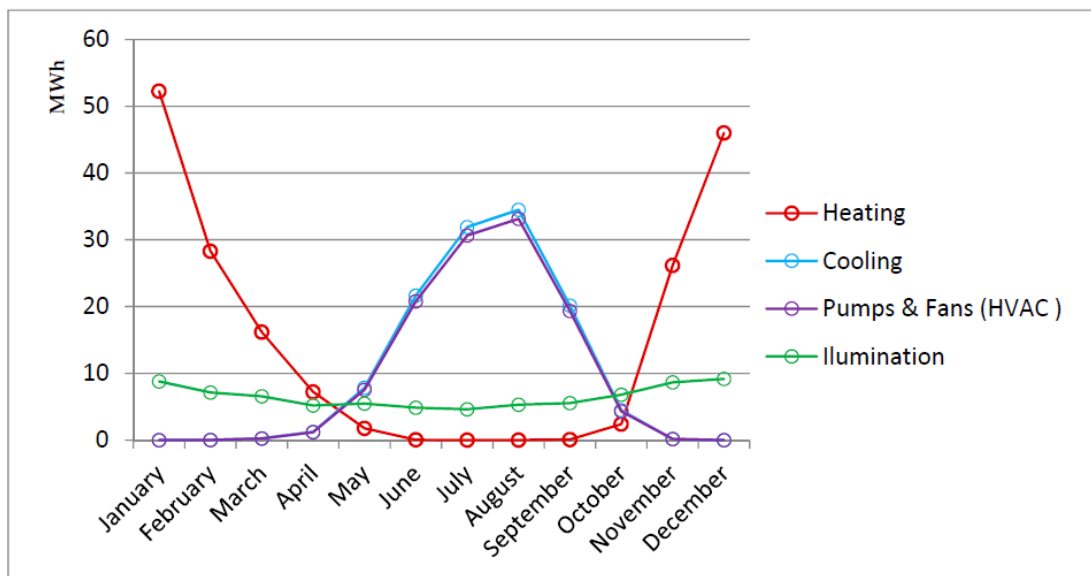


Gráfico 4. % Ahorro energético. Fuente: Elaboración propia.

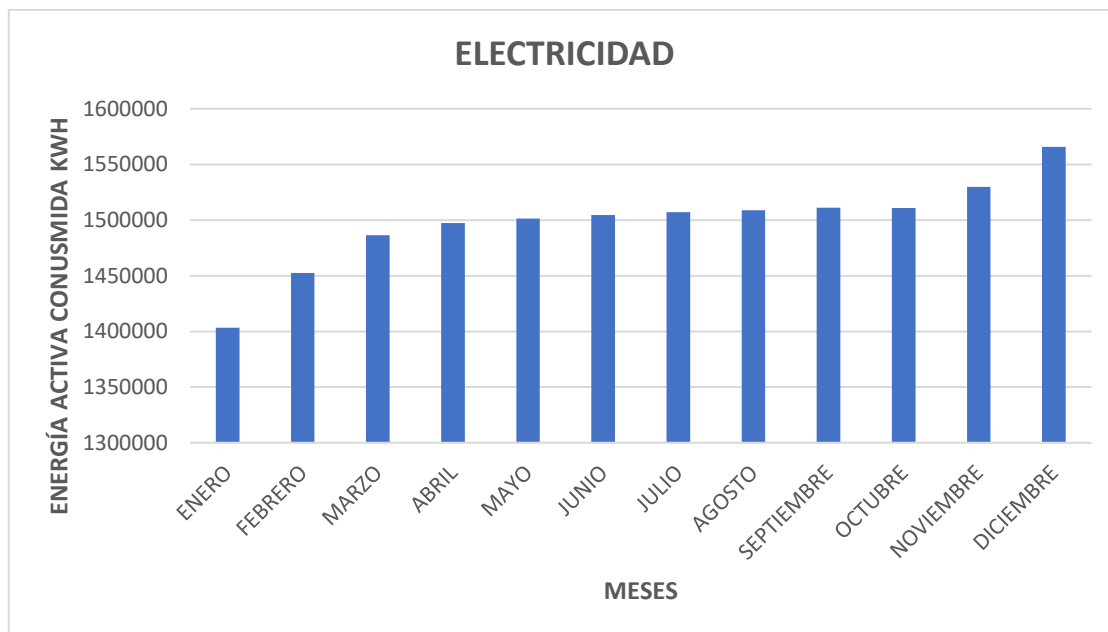
Gracias a la instalación del sistema de ventilación adicional, se permite mejorar la calidad del aire interior (IAQ) y garantizar el confort, bienestar y productividad de los ocupantes. Para ello, se incrementa al menos en un 30% el flujo de aire exterior hacia las áreas de respiración en todos los espacios. De esta forma, se garantiza un suministro adecuado de aire fresco para mantener un ambiente saludable y confortable en el edificio. Además, en relación con las bases del proyecto, el 75% de la luz empleada en los espacios regularmente ocupados es natural. Esta reducción tan significativa, se justifica con el empleo de una serie de tecnologías de recuperación y ahorro que se describen a continuación.

En el Gráfico 5, se presenta la evolución del consumo de energía desglosada a lo largo del año 2017, observándose un comportamiento que se ajusta a las expectativas estacionales. Por un lado, la demanda de iluminación disminuye a medida que los días se alargan, mientras que la demanda de refrigeración se incrementa de manera significativa durante los meses de verano, coincidiendo con una mayor actividad del sistema de climatización HVAC. Asimismo, la demanda de calefacción muestra un aumento durante los meses de invierno.



**Gráfico 5.** Consumo de energía LUCIA en 2017. Fuente: Rey-Hernández, J.M. (2019). *Energy and Environmental Sustainability of a Zero-Energy & Zero-Carbon Building*. [Tesis de Doctorado, Escuela de Doctorado Universidad de Valladolid].

Por otro lado, a partir de los datos recogidos a lo largo de los meses del año 2023, se puede observar el consumo de **energía activa** en el edificio LUCIA, es decir, aquella energía que permite funcionar a todos los aparatos conectados a la red eléctrica del edificio.



**Gráfico 6.** Energía totalizada subsistema en KWh año 2023. Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.** Consumo eléctrico mensual KWh año 2023. Fuente: Elaboración propia.

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1403416,68	1452400,67	1486563,64	1497235,8	1501243,86	1504562,41	1507073,67	1508727,44	1511123,58	1510767,32	1529768,65	1565721,88

El gráfico 6, presenta la variación mensual de la energía eléctrica en kilovatios hora (kWh) del edificio LUCIA, necesarios para poner en funcionamiento los diferentes sistemas de bombeo y ventilación, la unidad de chiller y la iluminación, a lo largo del año 2023. Los datos mostrados en el gráfico han sido adquiridos mediante un sistema de Monitorización y Control (SCADA), que permite supervisar y regular en tiempo real diversos parámetros.

Esto posibilita evaluar el desempeño del sistema, llevar a cabo un seguimiento detallado, analizar el consumo térmico del edificio y tomar decisiones sobre su mantenimiento y posibles mejoras en el futuro.

### 5.1.2.1 TECNOLOGÍA DE RECUPERACIÓN Y AHORRO.

El enfoque de los edificios de energía casi nula (nZEB), conforme a la **Directiva de Eficiencia Energética de Edificios (EPBD)**, se basa en reducir la demanda energética a través de la integración de sistemas pasivos. Si esto no es suficiente, se recurre a estrategias activas de aire acondicionado y, finalmente, a sistemas de energía renovable. Un indicador clave para evaluar un edificio nZEB es la Relación de Energía Renovable (RER), que muestra la proporción de energía renovable utilizada. En el caso estudiado, la RER es de 0.66 (Electricidad). De esta forma, se logra reducir el uso total de la energía no renovable un 31%, alcanzando una reducción del 90% en relación al impacto ambiental.

La UE está intensificando sus esfuerzos para mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad en el sector de la construcción, incorporando aspectos como la calidad del aire interior y la huella de carbono en las evaluaciones de rendimiento energético de los edificios.

El edificio LUCIA es un prototipo de arquitectura sostenible de energía CERO que combina distintas estrategias para reducir el consumo final de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Para lograr este objetivo es necesario incidir en tres cuestiones: reducir la demanda energética, lograr altos niveles de eficiencia de los sistemas y producir energía a partir de fuentes renovables.

Este ahorro energético en el edificio LUCIA nZEB, se alcanza con la integración de un **sistema de ventilación híbrido** compuesto por un **Intercambiador Aire-Tierra (EAHX)**, enfriamiento gratuito y enfriamiento evaporativo a partir de un **Intercambiador de Calor (AHU-HX)**. Todos ellos, bajo el control de un Sistema de Gestión de Edificios (BMS). El BMS gestiona y controla todos los parámetros energéticos y eléctricos a través de un protocolo de conexión ModBus. En el edificio caso de estudio, se cuenta con analizadores de red eléctrica distribuidos en todas las zonas para registrar la energía, lo que permite un control eficiente del consumo de energía y análisis del confort por zona.

El BMS, utilizando el software de adquisición de datos (SCADA), en este caso Siemens, supervisa y controla todos los sistemas e instalaciones y realiza un control predictivo de la respuesta del edificio. Este sistema recopila datos de sensores para seguir el comportamiento del edificio y detectar cualquier discrepancia con los parámetros establecidos previamente.

El sistema HVAC destaca como uno de los más sostenibles del mundo, aunque su instalación resulte algo compleja. Es crucial instaurar sistemas HVAC que minimicen la emisión de carbono y que puedan adaptarse de manera óptima a los estándares de confort requeridos. Un buen diseño y gestión del sistema de ventilación son clave para lograr altos niveles de calidad del aire interior (IAQ), optimizar el rendimiento del sistema en su conjunto y favorecer la demanda de calefacción y refrigeración, en línea con el objetivo de energía cero establecido por la UE para 2050.

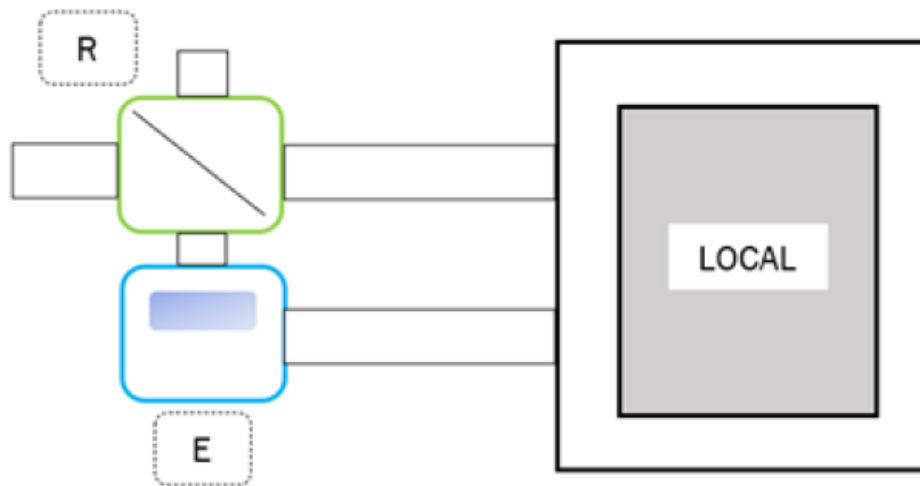


Con el fin de alcanzar con éxito los resultados establecidos, quedó constancia que el sistema de ventilación, hace uso de los intercambiadores de calor durante el 70% del tiempo de funcionamiento. Además, se demuestra que, gracias al empleo de este sistema, se permite optimizar los valores de recuperación de energía con un consumo mínimo de electricidad adicional.

El control dinámico de la energía del sistema de ventilación que incluye **free-cooling**, un **sistema geotérmico EAHX** y un **intercambiador de calor AHUHX aire-aire**, con recuperación evaporativa indirecta, demuestra los significativos beneficios que se obtienen con la implementación de esta estrategia, dentro de un edificio cero emisiones de carbono como el LUCIA.

- HVAC LUCIA:

La instalación de climatización del Edificio LUCÍA, nZEB, tiene un diseño energéticamente eficiente y sostenible basado en la recuperación de energía térmica mediante un **HX aire-aire** (R) integrando un **sistema de evaporación** de agua (E) que se utiliza cuando la demanda del edificio es la refrigeración, y en esta nueva configuración combinada (E + R) una unidad de refrigeración evaporativo indirecto opera como recuperador de calor, *ilustración 13*. El resultado de la recuperación de energía residual en el edificio nZEB es una disminución en el consumo energético en climatización, una descarbonización y una reducción tanto de los costes de inversión como de operación mejorando el impacto EC del ciclo de vida del edificio nZEB.



*Ilustración 13. Equipos de recuperación de energía (HX y enfriamiento evaporativo indirecto) integrados en el sistema UTA.*

El sistema de climatización HVAC del edificio combina **calefacción**, **refrigeración**, **ventilación** y un **sistema de recuperación** de energía residual de calor evaporativo, mediante el empleo de una gran cantidad de tecnologías eficientes. Esto incluye la recuperación de energía geotérmica y evaporativa, así como sistemas de absorción y refrigeración libre.

Para la climatización del edificio y la proporción de confort térmico, se hace uso de un sistema mixto **aire-agua**, con un climatizador (unidad de tratamiento de aire, UTA) funcionando a un caudal constante de hasta 15.000 m<sup>3</sup>/h. Además, se utiliza un sistema de fancoils de 4 tubos para controlar la carga de calor y refrigeración, permitiendo ajustes individuales según las necesidades de cada zona.

Tal y como ha sido mencionado anteriormente, el control inteligente de la UTA está gestionado por un **sistema BMS** que permite asegurar una gestión precisa de la demanda a partir del control de entalpía, garantizar estabilidad y alcanzar los parámetros de temperatura y humedad establecidos por la normativa española durante el año (40%-60% de humedad y 21°C a 26°C según los meses de invierno o verano, respectivamente).

El **sistema EAHX** del edificio utiliza 52 tuberías de diámetro 0,2 metros y 16m de largo cada una de ellas, proporcionando una longitud total de 832m.

Si es necesario, se activan sistemas de calefacción o refrigeración adicionales para cubrir la demanda del edificio.

Cuando se requiere **refrigeración**, el control BMS activa el modo free-cooling si la temperatura exterior es menor que la entalpía del área a climatizar, aumentando la eficiencia térmica, especialmente útil durante la noche (fuera del horario de funcionamiento del edificio). Cuando se requiere, se hace uso de una unidad de **absorción** y un **enfriador** convencional, complementados con sistemas de generación eléctrica para satisfacer la demanda restante. El calor residual se disipa a través de una torre de enfriamiento.

El sistema de ventilación, controlado por un SCADA inteligente, se basa en datos climáticos externos y parámetros interiores, seleccionando la mejor opción para el suministro de aire de la UTA, priorizando en todo momento el uso de sistemas de recuperación de energía, en lugar del empleo de la calefacción por biomasa o enfriamiento por la máquina de absorción. De esta forma, se aseguran niveles mínimos de calidad del aire interior de acuerdo con las normativas europeas y españolas, y se consigue maximizar la rentabilidad.

Los sensores IAQ monitorean la concentración de CO<sub>2</sub> para mantener la IAQ dentro de los límites deseables, y el control inteligente del sistema de ventilación (ventilador de suministro 11KW y ventilador de retorno 15 KW) ajusta el flujo de aire en consecuencia. El uso de un sistema de recuperación de calor con la gestión inteligente del sistema permite un ahorro en el consumo energético, ahorro económico, y un menor impacto ambiental.



Ilustración 14. Sistema de climatización.

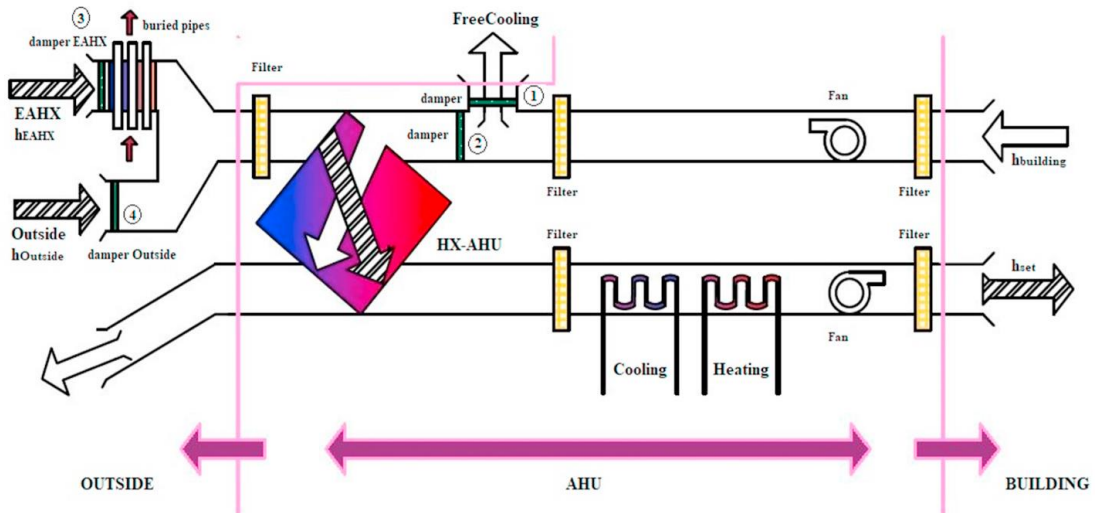


Ilustración 15. Sistema de Unidad de Tratamiento de Aire con recuperación evaporativo indirecta (UTA-HX).

En el gráfico siguiente (*gráfico 7*), se muestra el consumo simulado del sistema de ventilación a lo largo del año en kWh.

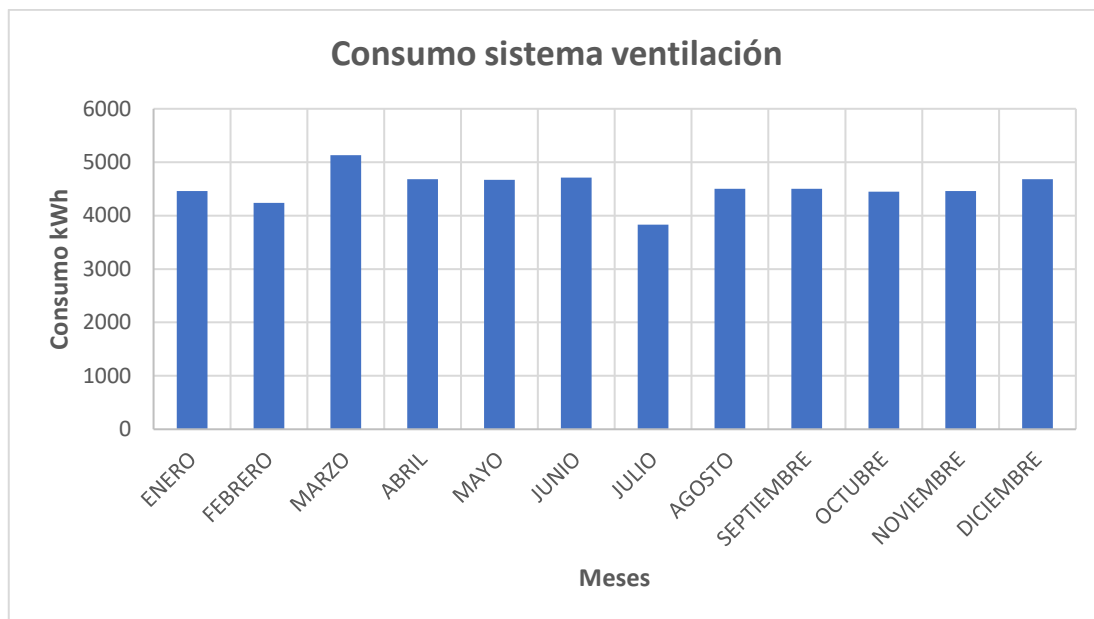


Gráfico 7. Consumo de ventilación simulado. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Consumo de ventilación simulado. Fuente: Elaboración propia.

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	TOTAL
4460	4240	5130	4680	4670	4710	3830	4500	4500	4450	4460	4680	54310

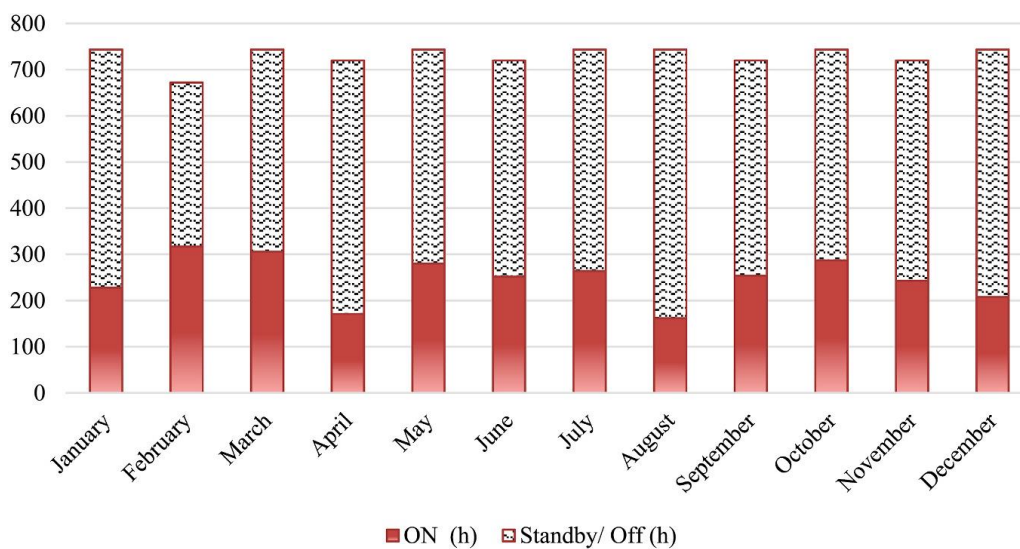
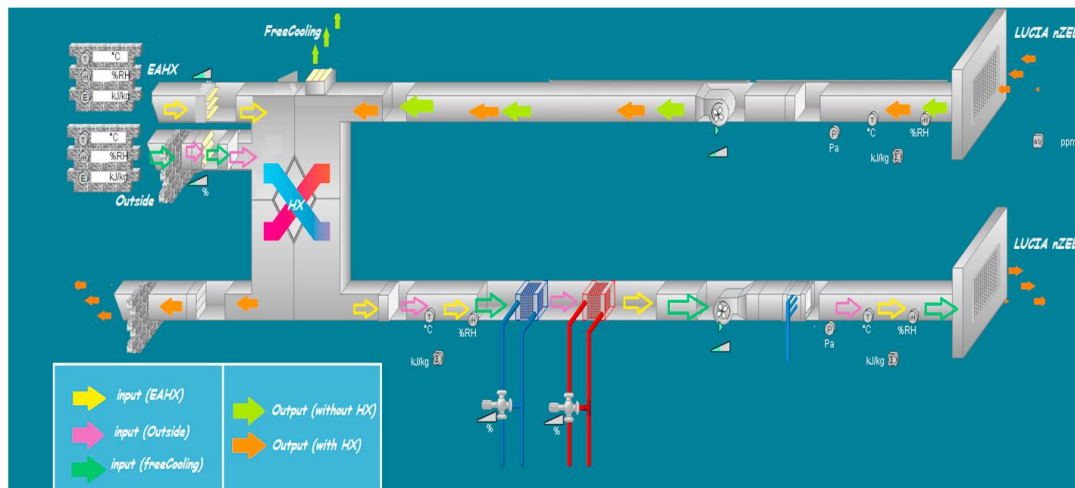


Gráfico 8. Horas de funcionamiento al mes del sistema HVAC. Fuente: Rey-Hernández, J. M., San José Alonso, J. F., Velasco Gómez, E., Yousif, C., y Rey Martínez, F. J. (2020). Performance analysis of a hybrid ventilation system in a near zero energy building. Building and Environment 185 2020, 107265. ELSEVIER, 12 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107265>.

Por otro lado, la instalación HVAC tiene un horario de funcionamiento de 14 horas diarias durante la semana. En el *gráfico 7*, se muestra el número de horas de funcionamiento del sistema de ventilación del edificio en el año 2019, donde se observa que permanece activo durante todo el año, con reducciones en los meses con más días festivos como abril, agosto y diciembre.

Dentro de los meses con mayor número de horas de operación, como febrero, marzo, mayo y octubre, debido a las condiciones climáticas de Valladolid, la recuperación geotérmica proporciona los valores más altos, mostrando una contribución significativa a la eficiencia del sistema de ventilación.

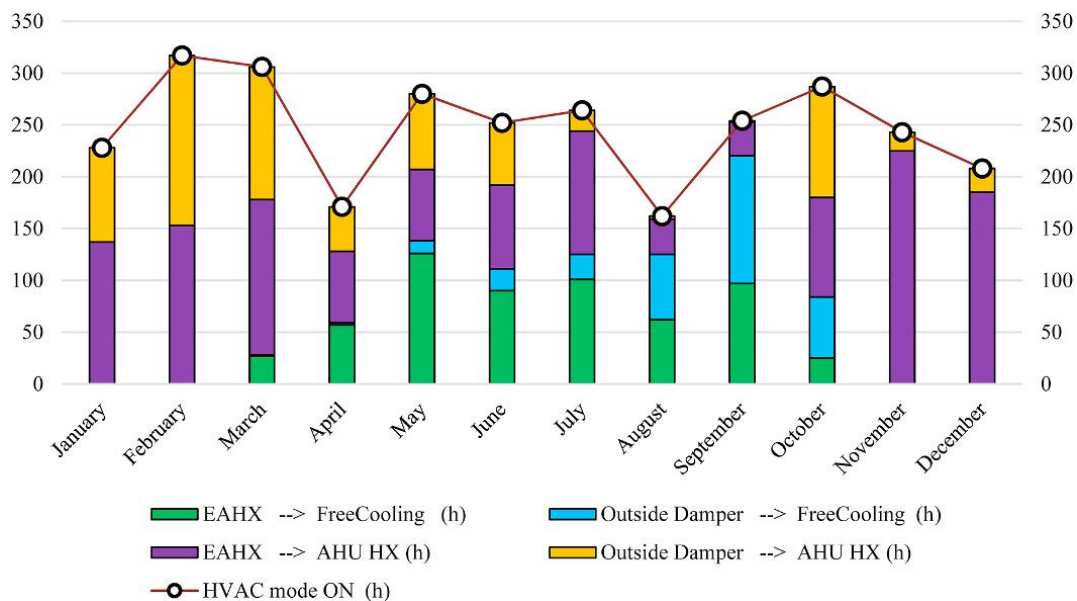
En definitiva, el sistema de ventilación del edificio LUCIA opera de manera eficiente durante todo el año adaptándose a las necesidades de confort térmico, con una **prioridad** en la utilización de la recuperación de **calor geotérmico** para maximizar la eficiencia energética del edificio.



*Ilustración 16. Sistema de climatización HVAC. SCADA*

Sin embargo, a veces se combinan diferentes sistemas para adaptarse a las necesidades energéticas y de confort del edificio.

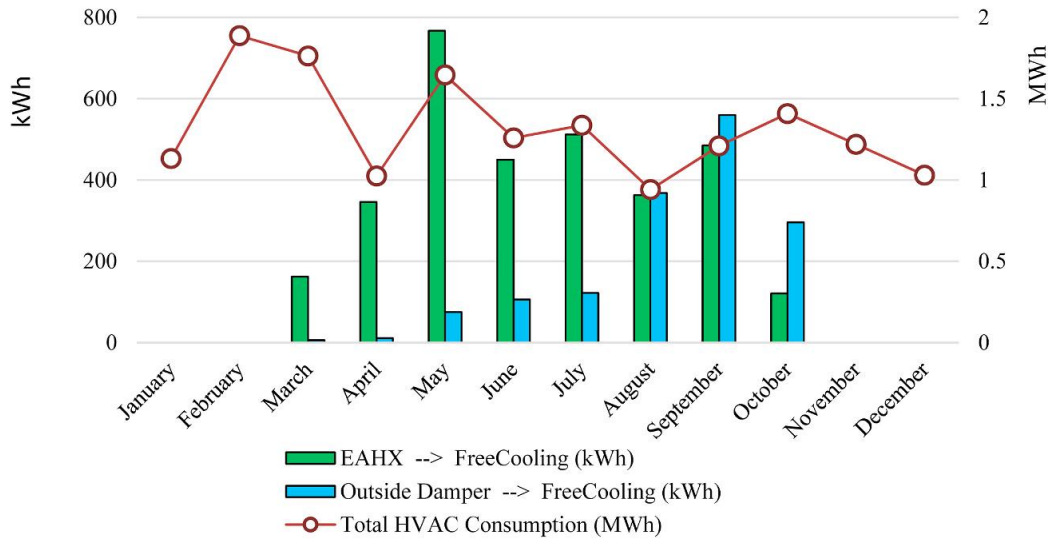
Tal y como se puede observar en el *gráfico 9*, durante los períodos en los que no se necesita aire acondicionado (invierno), el consumo energético tiene el mayor consumo eléctrico en el sistema de ventilación, con una alta utilización de los sistemas de recuperación geotérmica. Durante los meses más cálidos (verano), el consumo energético se distribuye entre el free-cooling y el uso de la UTA vinculada al sistema de recuperación geotérmica.



**Gráfico 9.** Empleo de sistemas en función de las condiciones climáticas. Fuente: Rey-Hernández, J. M., San José Alonso, J. F., Velasco Gómez, E., Yousif, C., y Rey Martínez, F. J. (2020). Performance analysis of a hybrid ventilation system in a near zero energy building. *Building and Environment* 185 2020, 107265. ELSEVIER, 12 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107265>.

En el *gráfico 10*, se puede observar la variación del consumo de energía del sistema de ventilación (UTA) cuando se pone en funcionamiento el modo freecooling, a través de la compuerta de entrada EAHX para los diferentes meses del año.

Analizando los resultados obtenidos, se puede afirmar que el consumo total del sistema de ventilación a través de este modo de operación seleccionado, presenta unos valores mayores en los meses de verano, cuando el interior del edificio requiere de un sistema adicional para la refrigeración y con ello, la mejora del confort térmico durante los meses más calurosos del año.

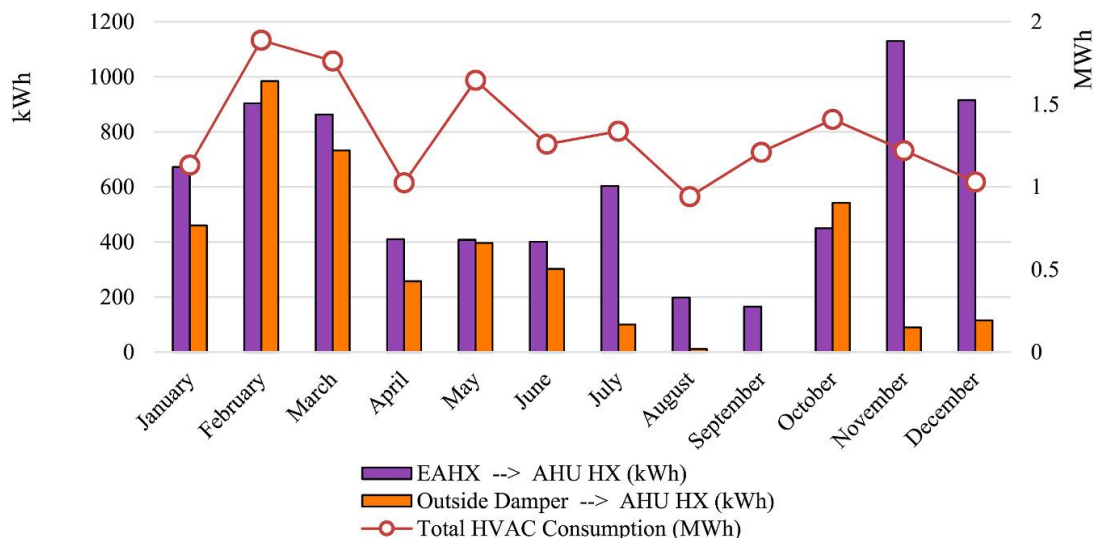


**Gráfico 10.** Consumo de energía de UTA cuando se utiliza en modo freecooling, con la compuerta de entrada EAHX y la compuerta externa para diferentes meses. Fuente: Rey-Hernández, J. M., San José Alonso, J. F., Velasco Gómez, E., Yousif, C., y Rey Martínez, F. J. (2020). Performance analysis of a hybrid ventilation system in a near zero energy building. *Building and Environment* 185 2020, 107265. ELSEVIER, 12 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107265>

En el *gráfico 11*, adjunto a continuación, se puede observar la variación del consumo de energía del sistema de ventilación (UTA) cuando se pone en funcionamiento el intercambiador de placas, a través de la compuerta de entrada EAHX para los diferentes meses del año.

Analizando los resultados obtenidos, se puede afirmar que el consumo total del sistema de ventilación a través de este modo de operación seleccionado, presenta unos valores mayores en los meses de invierno, cuando el interior del edificio requiere de un sistema adicional para la calefacción y con ello, la mejora del confort térmico aumentando la temperatura interior del edificio durante los meses más fríos del año.

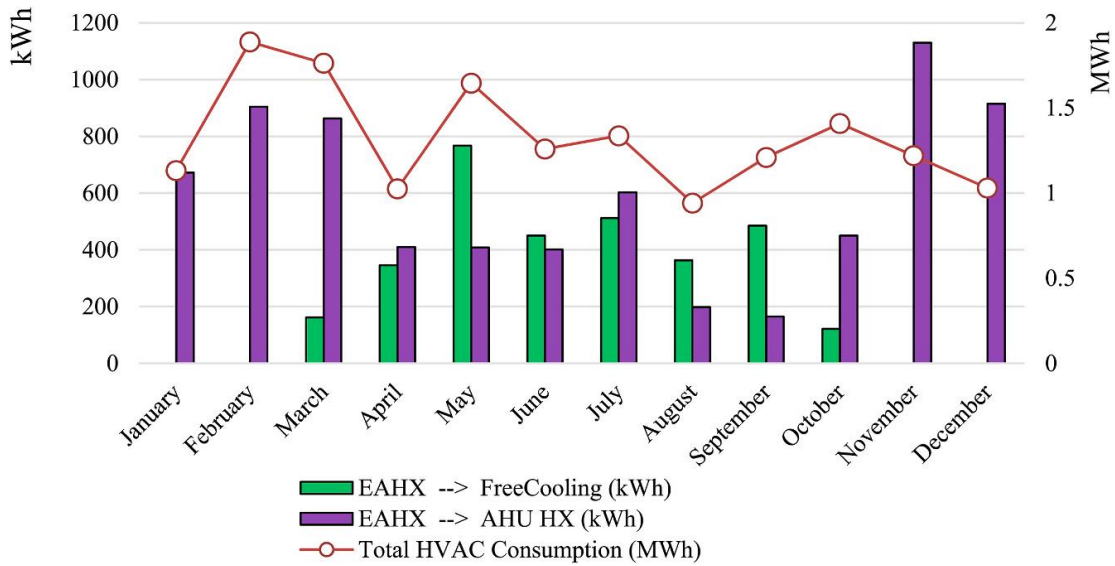




**Gráfico 11.** Consumo de energía de UTA cuando se utiliza el intercambiador AHU-HX, a través de la compuerta de entrada de aire EAHX y a través de la compuerta de entrada de aire exterior al mes. Fuente: Rey-Hernández, J. M., San José Alonso, J. F., Velasco Gómez, E., Yousif, C., y Rey Martínez, F. J. (2020). Performance analysis of a hybrid ventilation system in a near zero energy building. *Building and Environment* 185 2020, 107265. ELSEVIER, 12 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107265>.

En el gráfico 12, se puede comparar el consumo de energía del sistema de ventilación (UTA) cuando se pone en funcionamiento ambos modos de operación, el freecooling y el intercambiador de placas. Del mismo modo que en los casos anteriores, a través de la compuerta de entrada.

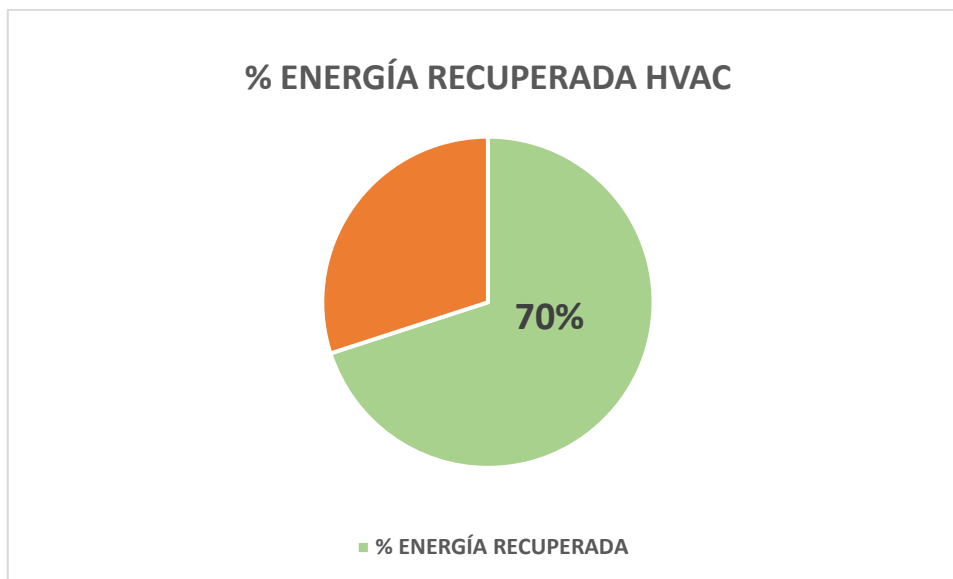
Analizando los resultados obtenidos, se puede observar la diferencia del consumo térmico a partir de los distintos modos de funcionamiento de manera mensual durante el año 2019. Los meses en los que la demanda de calefacción aumenta considerablemente, el intercambiador de placas es el responsable mayoritario del consumo energético. Por el contrario, los meses en los que la demanda de refrigeración es más significativo, el freecooling es el encargado de aportar la energía necesaria.



**Gráfico 12.** Comparación del consumo de energía de los ventiladores para el modo Free Cooling y el modo AHU-HX a través de la compuerta del intercambiador de calor geotérmico por mes.

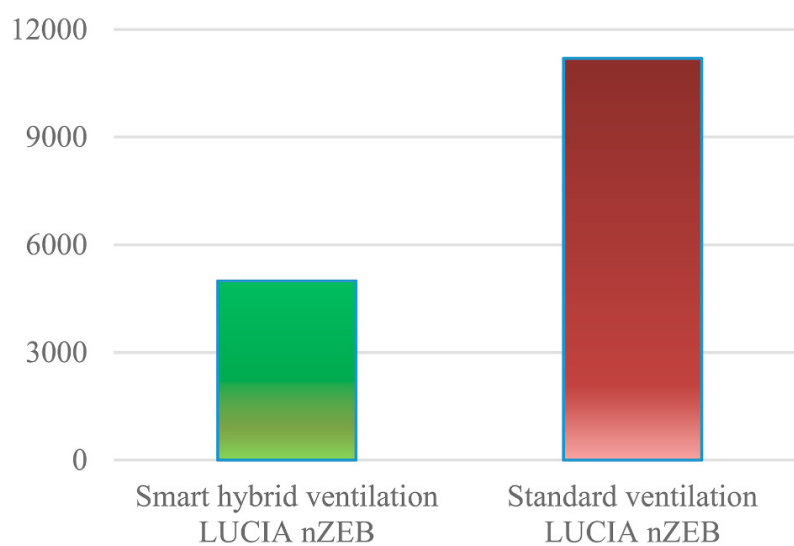
Fuente: Rey-Hernández, J. M., San José Alonso, J. F., Velasco Gómez, E., Yousif, C., y Rey Martínez, F. J. (2020). Performance analysis of a hybrid ventilation system in a near zero energy building. *Building and Environment* 185 2020, 107265. ELSEVIER, 12 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107265>

El estudio realizado, se centra en la importancia de garantizar una ventilación eficiente y de alta calidad para cumplir con los estándares de calidad del aire interior en edificios de energía neta cero (nZEB), según las regulaciones europeas y españolas. Para ello, se emplea un sistema de ventilación mecánica que combina la recuperación de calor del aire geotérmico, la recuperación de calor por evaporación y el free-cooling. Gracias a la capacidad de adaptación del sistema de ventilación, se garantiza un adecuado confort térmico en el interior del edificio LUCIA, una alta eficiencia energética y un bajo costo operativo, obteniendo una recuperación del 70% de la energía suministrada.



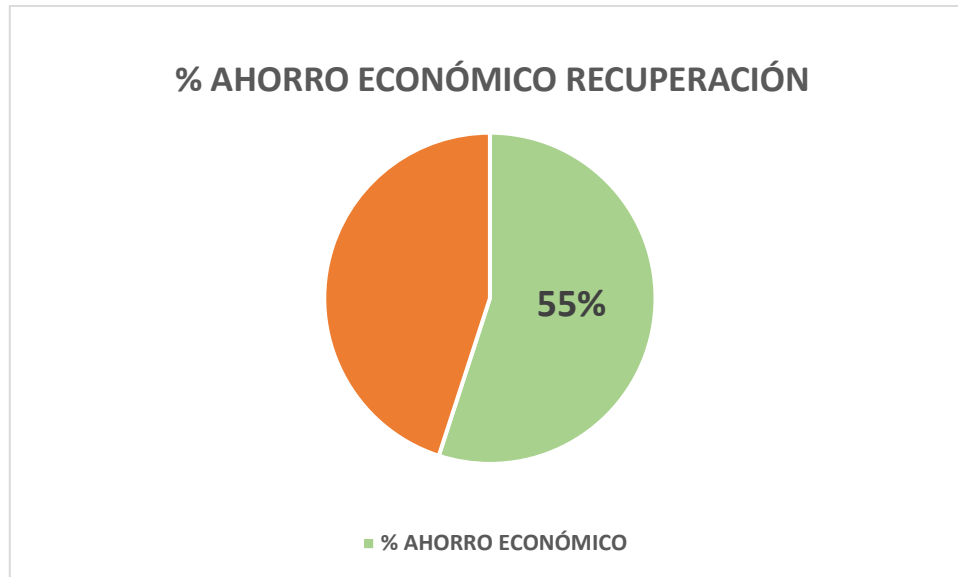
**Gráfico 13.** Energía recuperada con el sistema de ventilación. Fuente: Elaboración propia.

La gestión inteligente de todos estos sistemas combinados permite alcanzar un costo energético total de casi 5.000 euros al año para un sistema de ventilación de 15.000 m<sup>3</sup>/h y una superficie útil de 7500 m<sup>2</sup>.



**Gráfico 14.** Costos económicos de energía en LUCIA nZEB por estrategia de ventilación. Fuente: Rey-Hernández, J. M., San José Alonso, J. F., Velasco Gómez, E., Yousif, C., y Rey Martínez, F. J. (2020). Performance analysis of a hybrid ventilation system in a near zero energy building. *Building and Environment* 185 2020, 107265. ELSEVIER, 12 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107265>

Además, observando el gráfico 15, la implementación de un sistema de control inteligente en la estrategia de ventilación híbrida HVAC, conlleva ahorros económicos anuales del 55% en comparación con la ventilación estándar.



*Gráfico 15. Ahorro económico con la recuperación de energía. Fuente: Elaboración propia.*

Sin embargo, el estudio sobre nuevos sistemas de ventilación integrada, sigue en proceso de investigación. Una posible opción de mejora sería la incorporación de otros sistemas de energía renovable como bombas de calor en modo de recuperación, y el estudio de sistemas de evaporación indirecta con materiales cerámicos.

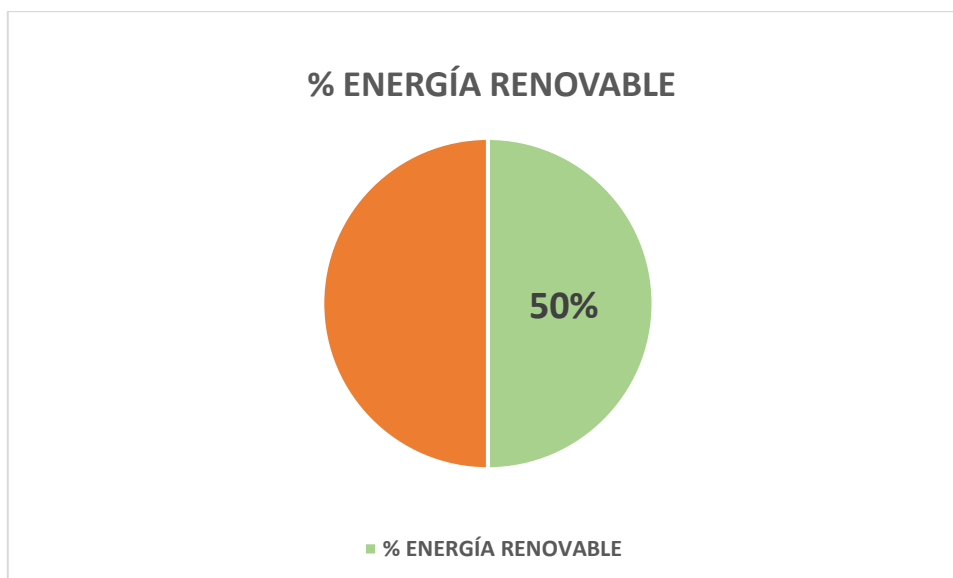
### 5.1.2.2 TECNOLOGÍAS RENOVABLES.

Para definir a un edificio como nZEB, existen una serie de indicadores que se recogen en la norma del código técnico de edificación (CTE).

Entre ellos, se encuentra el hecho de conseguir que el consumo de energía primaria no renovable sea inferior a 110 kWh/m<sup>2</sup>. Al mismo tiempo, del total de la producción de energía primaria, al menos el 50% debe ser renovable.

Sin embargo, en el edificio caso de estudio, el objetivo es ir más allá de los estándares de eficiencia energética para mitigar los impactos ambientales y económicos derivados del exceso de consumo de energía, y alcanzar niveles crecientes.

El edificio LUCIA ha sido concebido con la capacidad de generar el 50% de su energía total a través de fuentes renovables, priorizando el uso de biomasa como combustible. Esta estrategia busca disminuir su dependencia de fuentes externas de energía, lo que a su vez reduce su impacto ambiental y los costos asociados, incluyendo las emisiones de CO<sub>2</sub> y el agotamiento de recursos naturales asociados a la producción de energía convencional. Del mismo modo, se optimiza el rendimiento de los sistemas.



**Gráfico 16.** Energía renovable empleada. Fuente: Elaboración propia.

- **BIOMASA: District heating.**

En los últimos años, la Unión Europea ha destinado gran cantidad de fondos para la mejora de la eficiencia energética en el sector de la construcción, promoviendo el aumento del uso de energías renovables y la construcción de edificios de consumo energético casi nulo (nZEB).

En este ámbito, la biomasa se reconoce como uno de los recursos energéticos renovables más abundantes en la UE y ha recibido una atención especial en este contexto. Esta fuente de energía, desempeña un papel importante en la economía circular al proporcionar una fuente de energía a partir de materia orgánica, minimizando el desperdicio y cerrando ciclos de materia. El carbono contenido en la biomasa proviene de la atmósfera durante el crecimiento de las plantas. Por lo tanto, la combustión de la biomasa tiene un balance neutro de dióxido de carbono, a diferencia de los combustibles fósiles como el gas o el gasoil, que contribuyen al aumento de las emisiones de carbono en la atmósfera y empeoran el medio ambiente.

El objetivo fundamental debería ser modernizar gradualmente los edificios hacia estándares de consumo energético casi nulo (nZEB) a medio plazo, teniendo presente el Pacto Verde Europeo, asegurando un suministro energético adecuado en la UE. Este punto es clave para un desarrollo sostenible en todos los campus universitarios, enfocándose en implementar sistemas de energía térmica renovable que cumplan con los nuevos requisitos.

El edificio LUCIA trató de adoptar la tecnología BIOELEC100, desarrollada por la Fundación Cidaut, para cubrir sus demandas energéticas. Sin embargo, este sistema de cogeneración a pequeña escala basado en la gasificación de biomasa, no logró implementarse de manera eficaz para satisfacer las necesidades de energía térmica y eléctrica del edificio de manera eficiente.

Por esta razón, surge la necesidad del empleo de un **DHS, Red de Calor (District Heating)** alimentado con energía renovable que utiliza **biomasa**.

Da servicio a 24 edificios de la Universidad de Valladolid (UVA) incluido entre ellos, el edificio nZEB caso de estudio, 3 edificios propiedad del Ayuntamiento de Valladolid y 4 pertenecientes a la Junta de Castilla y León.

Una red de calefacción urbana, conocida en inglés como District Heating (DH), es un sistema que proporciona calor para calefacción y agua caliente sanitaria (ACS) a través de una red de dobles tuberías subterráneas desde una central térmica hasta los edificios, que se desean abastecer. Este sistema también puede proporcionar refrigeración, en cuyo caso se denomina District Cooling (DC). Cuando una red puede suministrar tanto calor como frío, se llama District Heating and Cooling (DH&C).

La adjudicación de la oferta para ejecutar la Central Térmica y el desarrollo de la Red de Calor se produjo por un total de 7 millones de euros, de los que 5 millones se dedicaron a la ejecución de obra y 2 millones de euros a la gestión del mantenimiento. Es un claro ejemplo del potencial de la biomasa forestal como combustible alternativo y de su capacidad para generar un nuevo sector productivo en nuestra comunidad. Por ello, ha contado con el apoyo y la implicación de la UVA y la JYL y su construcción ha sido posible gracias a la financiación del Banco Europeo de inversiones.

Antes de la renovación, los diferentes edificios tenían un consumo de combustibles fósiles para calefacción y agua caliente, que iba desde los 60 hasta los 430 kWh/m<sup>2</sup> por año. Al instalar este sistema de calefacción centralizada, se pudo cumplir con el estándar mínimo para edificios de consumo de energía casi nulo (nZEB) de 100-120 kWh/m<sup>2</sup> año. Esto significa que se ha logrado reducir significativamente el consumo de energía y hacer que los edificios sean mucho más eficientes en términos energéticos.

Al mismo tiempo, la implementación del nuevo sistema de calefacción ha llevado a una reducción masiva en las emisiones totales de dióxido de carbono, disminuyendo en un 92,69% en comparación con la antigua caldera que funcionaba con combustibles fósiles.

Este caso, demuestra claramente que las renovaciones energéticas mediante sistemas de calefacción urbana basados en energías renovables DHS, tienen la capacidad de alcanzar los estándares de edificios de consumo de energía casi nulo (nZEB). Es un claro ejemplo, del gran potencial que tienen estas estrategias para transformar los edificios hacia una mayor eficiencia energética, reducir significativamente su huella de carbono y dirigirse hacia un entorno más limpio y sostenible.

Un total de 19 MW de potencia abastece el District Heating. La construcción da servicio térmico a los 31 edificios públicos de la zona norte de Valladolid gracias a los equipos generadores de energía térmica con biomasa.

El sistema District Heating (DH), consta de tres componentes principales: la central térmica, la red de distribución de tuberías y las subestaciones de transferencia térmica en los edificios.

La **central térmica** (1400 m<sup>2</sup>), se encuentra anexa al edificio LUCIA. La ubicación está específicamente seleccionada para aprovechar todas las ventajas que la parcela ofrece para su integración en el entorno del Campus Universitario.



*Ilustración 17. Central de biomasa UVA*

Consta de una nave correspondiente a la sala de calderas y otra al silo almacén del biocombustible. Puede funcionar con diferentes fuentes de energía, en este caso la biomasa, la cual produce calor o frío de manera centralizada, eliminando la necesidad de equipos individuales en cada punto de consumo.

La biomasa procedente de los montes de la región (pinos y chopos), se recepciona en la zona de alimentación, la cual cuenta con su propio equipo de cribado y con dos líneas independientes de impulsión neumática que permiten el llenado completo del silo almacén de materia prima cuya capacidad supera los 1800 m<sup>3</sup>, suficiente para atender las necesidades de la red en máxima demanda durante 15 días.

Desde la zona de almacenamiento de la biomasa, se alimentan los equipos térmicos mediante un sistema compuesto por suelos móviles y tornillos sin fin.

En 2018, todos los edificios se conectaron al sistema de calefacción urbana renovable (DHS), que cuenta con tres calderas o equipos de combustión de 4,7 MW cada una. Cada caldera cuenta con equipos de filtrado y limpieza de humos, ciclones y filtros de mangas que permiten unas emisiones de partículas a la atmósfera muy por debajo de los valores marcados por la normativa ambiental. Así mismo, en la sala de calderas se han ubicado dos grandes depósitos de inercia de 40000 litros cada uno, necesarios para la regulación del proceso.

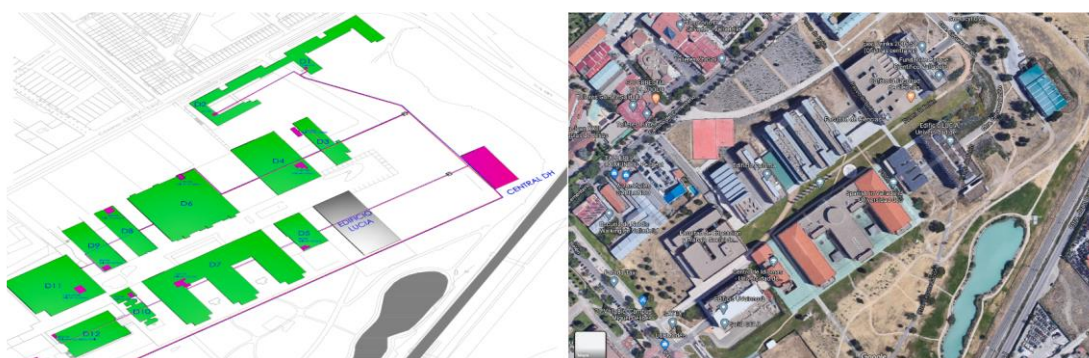
Sin embargo, en 2019 se agregó una cuarta caldera de 5 MW con el fin de ampliar la red de consumo a las instalaciones existentes para satisfacer la demanda del Hospital Clínico Universitario.

Por ello, actualmente El DHS de la Universidad de Valladolid tiene una capacidad total de 19,1 MW y utiliza más de 12 km de tuberías para llevar calefacción y agua caliente sanitaria (ACS). Este sistema funciona de forma automatizada, ajustándose a la demanda detectada por sistema de control digital ubicados tanto en la central térmica como en los edificios, quemando alrededor de 11 toneladas de astillas de residuos forestales al año.





*Ilustración 18. Esquema funcionamiento central biomasa UVA. Fuente: Elaboración propia.*



*Ilustración 19. DHS Universidad de Valladolid y Central Térmica.*

La **red de distribución** de calor, está formada por más de 12 km de tuberías de acero preaislado, con diámetros comprendidos entre Dn 32 y Dn 350. Se encargan de transportar la energía hasta los puntos de consumo cediendo de esta manera el calor, es decir, enfriando el fluido, para el caso de redes de calefacción. El sistema de tuberías se puede simplificar en **dos circuitos** independientes, cada circuito está equipado con tres bombas de caudal variable en paralelo, lo que ayuda a reducir el consumo eléctrico necesario para hacer funcionar el sistema.

El **primero** de ellos suministra energía térmica a todos los edificios del campus Miguel Delibes y discurre en su mayor parte por el parking subterráneo de este, suministrando calor a los 12 edificios de este Campus.

El **segundo** circuito, rodea el campus miguel Delibes, para posteriormente atravesar por completo el campus Rio Esgueva, dando servicio de calefacción a otros 15 edificios y al hospital clínico universitario. También están conectado otros 4 edificios pertenecientes a la JyL.



*Ilustración 20. Red de distribución Valladolid. Fuente: UVa\_Online.*



*Ilustración 21. Red distribución DHS.*

Por las tuberías discurre energía térmica en forma de agua caliente a una temperatura de 90 ° C. La red está conectada a cada uno de los 32 edificios, de manera subterránea gran parte de esta, minimizando las pérdidas térmicas y, finaliza en un intercambiador de calor instalado en su sala de calderas, sustituyendo a la caldera existente que quedará como una instalación complementaria de seguridad en caso de parada de la red. A través de este equipo, se cede su energía al agua del circuito de cada edificio, manteniendo en todo momento la independencia entre los circuitos de la red y de cada edificio mediante un intercambiador de placas.

De esta forma, la caldera central de gas queda apagada pero funcional. En ese momento se produce el cambio de un combustible fósil a uno renovable, la biomasa. Paralela a la tubería de ida, transcurre la de retorno, que vuelve con agua fría a 70°C a la central térmica, ambas totalmente aisladas para minimizar la pérdida de calor en los 11,30 kilómetros de Red.

Puesto que el punto final de la red está conectado con el inicio por cuestiones de seguridad en el suministro, la configuración de la red se caracteriza por ser una distribución en anillo.

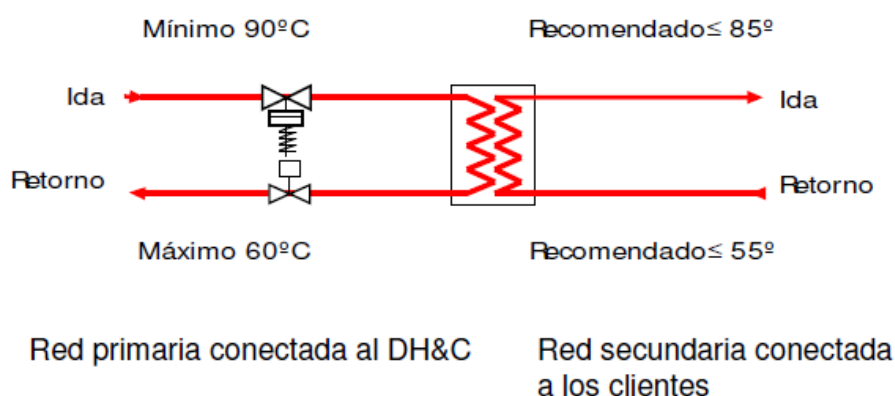
Finalmente, indicar que cuenta con un avanzado sistema de detección de fugas además de una red de fibra óptica propia para intercomunicar todos los puntos de consumo con la central térmica de generación.

**Las subestaciones** de transferencia térmica en los edificios permiten la transferencia de calor entre la red de distribución y los edificios. Estas subestaciones se encuentran en la planta baja del edificio conectada a la red de distribución y están equipadas con intercambiadores de calor, sistemas de regulación y contadores de energía térmica.

Existen dos tipos de subestaciones: directas e indirectas. Las subestaciones directas reciben directamente el agua del DH para calefacción y ACS, mientras que las subestaciones indirectas utilizan un intercambiador de calor antes de distribuir el calor en el edificio. Este último tipo puede trabajar a temperaturas más altas (140°C/75°C) y reducir los costos y el espacio necesario, y es el modelo empleado en el edificio caso de estudio.

Al mismo tiempo, se podrá contar con subestaciones de calor o frío en función de las necesidades. Sin embargo, en nuestro caso, se trata de una subestación de calor. Para esta situación, la tubería de impulsión deberá llevar como mínimo el fluido calo-portador a 90 °C, y tener un máximo de 70 °C en la tubería de retorno. En cuanto a la red secundaria, la red conectada a los usuarios, lo recomendado es una temperatura menor de 65 °C y en la tubería de retorno, una temperatura menor de 55 °C.

## SUBESTACIÓN DE CALOR



*Ilustración 22. Esquema subestación de calor. Fuente: Galindo Llorente, P. (2018). Estudio del consumo energético en un District Heating (DH) de la Universidad de Valladolid [Trabajo Fin de Grado. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales]. UVaDOC. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/28844>*

En la tabla adjunta a continuación, se observa el consumo total de energía, las toneladas de astillas empleadas y las emisiones producidas por el sistema de calefacción (DH).

*Tabla 5. Consumos totales DH UVA. Fuente: Elaboración propia.*

CONSUMO	UVA	AYUNTAMIENTO VALLADOLID	JyL	TOTAL anual
<b>CONSUMO ENERGÉTICO</b>	17.187.869 kWh	515.180 kWh	4.366.685 kWh	22.069.734 kWh
<b>ASTILLAS</b>	6.140 toneladas anuales	183,74 toneladas anuales	1.561,43 toneladas anuales	7.886 toneladas anuales
<b>EMISIONES</b>	5.446 TnCO <sub>2</sub> /anuales	170 TnCO <sub>2</sub> /anuales	1.195 TnCO <sub>2</sub> /anuales	6.800 TnCO <sub>2</sub> /anuales

Este sistema, ha desempeñado un papel fundamental en la reducción de emisiones, logrando evitar 122,000 toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) al año. Sin embargo, es importante destacar que el ciclo de emisiones de la biomasa es considerado neutral. Esto se debe a que el CO<sub>2</sub> liberado durante la combustión de biomasa es compensado por el CO<sub>2</sub> absorbido durante el crecimiento de las plantas utilizadas como materia prima. Por lo tanto, aunque técnicamente se evita la emisión de una cantidad significativa de CO<sub>2</sub>, estas emisiones se consideran neutras desde una perspectiva de balance de carbono, y no se contabilizan como emisiones netas adicionales al medio ambiente.

El monitoreo en tiempo real está integrado con un sistema de gestión de edificios (BMS) mediante un sistema SCADA, lo que permite supervisar los niveles de consumo energético de cada edificio de manera precisa y actualizada.

El edificio LUCIA, se ubica en el Campus Miguel Delibes, en el Paseo de Belén, 19, 47001, Valladolid. Se encuentra a una distancia de 100 metros de la central térmica.



*Ilustración 23. Edificio LUCIA y Central Térmica. Distancia red.*

La transferencia de calor entre la red de distribución de energía térmica y el edificio LUCIA se realiza a través de una subestación equipada con un intercambiador de calor y dispositivos de regulación y control para garantizar un funcionamiento óptimo. Las tuberías que conectan la red con la subestación del edificio, ingresan al edificio de manera subterránea. Una vez dentro, estas tuberías, tanto la de impulsión como la de retorno, llegan al cuarto de calderas del edificio, donde se encuentra la subestación térmica. Esta subestación se encarga de ajustar la presión y la temperatura de la red de distribución a las condiciones necesarias, asegurando así una eficiencia adecuada del sistema.



*Ilustración 24. Subestación edificio LUCIA*

La conexión entre la red de distribución y la el LUCIA se establece de manera indirecta a través de un intercambiador de calor, específicamente un intercambiador de placas. Esto significa que hay dos circuitos independientes: el primario, que va desde la central térmica hasta la subestación con el intercambiador de calor, y el secundario, que va desde la subestación con el intercambiador de calor hasta los puntos de consumo del edificio.

El intercambiador de calor está aislado térmicamente para evitar pérdidas de calor y el funcionamiento del sistema es el siguiente: la red de calor llega al edificio y las tuberías de impulsión y retorno se dirigen hacia la sala de calderas. La tubería de impulsión pasa por un filtro y una válvula de regulación antes de llegar al intercambiador de calor. Este intercambiador ajusta la temperatura del fluido, que luego es bombeado hacia las diferentes zonas del edificio.

Una vez que el edificio ha sido abastecido, el fluido retorna a la sala de calderas, pasando por un filtro y un contador térmico para controlar el consumo. Luego, el fluido pasa nuevamente por el intercambiador de calor y retorna al circuito primario hacia la central térmica.

Toda la subestación está equipada con manómetros de presión y temperatura para supervisar su correcto funcionamiento. Las temperaturas de impulsión y retorno deben mantenerse dentro de rangos específicos (90°C y 70°C) para garantizar el funcionamiento óptimo del sistema. Para ello, se hace uso de software informáticos para visualizar y controlar el funcionamiento de la instalación en todo momento, lo que permite detectar rápidamente cualquier posible fallo y localizar el problema con precisión.

Por otro lado, a partir de los datos recogidos a lo largo del año sobre la demanda de calor necesaria para satisfacer el edificio, se obtiene el *gráfico 17*, adjunto a continuación.

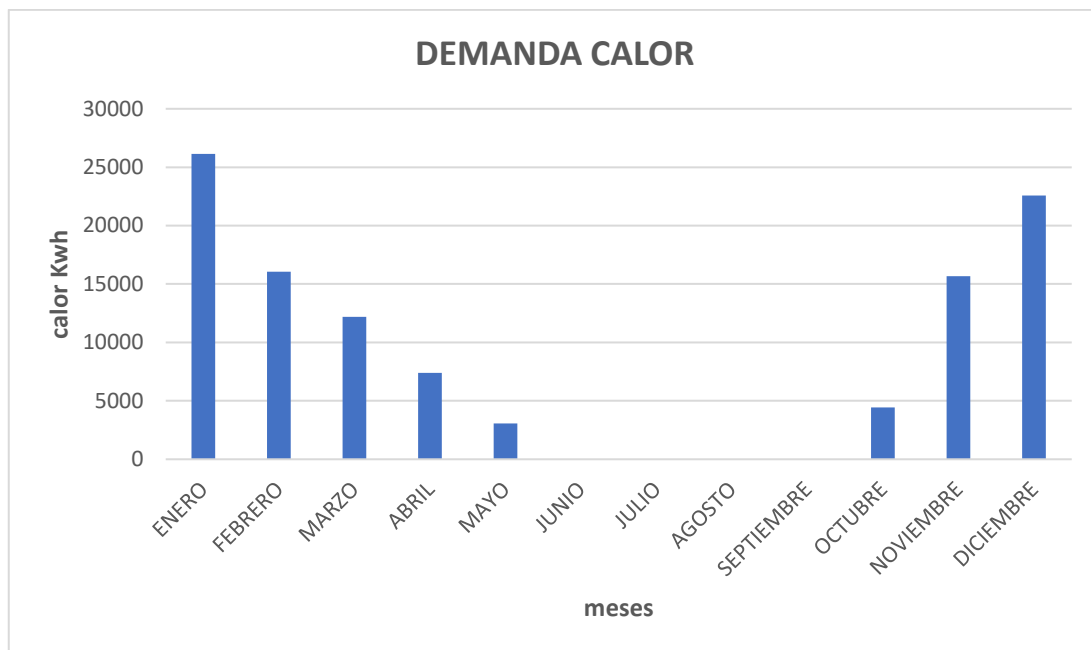


Gráfico 17. Demanda de calor total del edificio. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Demanda de calor total del edificio.

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	TOTAL (KWh)
26152	16067	12201	7387	3056	0	0	0	0	4423	15675	22589	107550

Al analizar los resultados, se evidencia que la demanda de calor es significativamente mayor durante los meses de invierno, cuando el edificio requiere calefacción para mantener las diferentes áreas a una temperatura confortable. En contraste, durante los meses de verano, no se necesita este aporte de calor, lo que implica que el sistema de calefacción urbana (DH) permanece inactivo durante este período.

Entre las ventajas a nivel técnico que ofrece, se encuentra el hecho de evitar riesgos de fugas y escapes, molestias o ruidos en las descargas de combustibles, y olores procedentes de los cuartos de calderas. La generación de empleo local y revitalización del medio rural es uno de los puntos básicos de las ventajas sociales. El 100% del coste de la biomasa se genera y consume en el territorio nacional, evitando déficit comercial internacional. Un megavatio de energía producida mediante biomasa produce 10 puestos de trabajo indirectos.

El empleo de biomasa como fuente de energía renovable para satisfacer el DHS, ha logrado reducir la dependencia de combustibles fósiles y minimizar el impacto ambiental, reafirmando el compromiso de la universidad de Valladolid por el empleo de prácticas sostenibles.

A partir de los datos mensuales de energía térmica recogidos, permite tener conocimiento significativo sobre cómo se utiliza la energía en el edificio, lo que permite identificar áreas donde se puede mejorar la eficiencia energética y optimizar el funcionamiento del sistema de calefacción.

Por otro lado, cabe destacar que gran parte de la cantidad de energía no renovable empleada, se debe al consumo eléctrico necesario para el sistema de bombeo en el DHS.

Gracias a la mayor utilización de fuentes de energía renovables (50%), para satisfacer el sistema de calefacción urbana, el edificio LUCIA ha alcanzado la capacidad de poder definirse como un edificio nZEB, según el CTE español.

Por consiguiente, al implementar el nuevo sistema de calefacción con biomasa e integrarlo en el edificio LUCIA, el porcentaje de edificios renovados a estándares de consumo de energía casi nulo (nZEB) en todo el Campus de la UVA alcanzó el 78,95%, lo que resulta en un campus universitario mucho más sostenible y orientado hacia las energías renovables.

Además, gracias al empleo de energías renovables se ha conseguido una reducción de 150 toneladas de CO<sub>2</sub> eq/año.



## - GEOTERMIA DEL AIRE.

El sistema de pre-acondicionamiento del aire mediante energía geotérmica es una solución innovadora y sostenible para reducir la demanda energética en los edificios, al tiempo que se proporciona un ambiente interior confortable y saludable.

El terreno es un gran acumulador de energía, recibiendo calor tanto del sol como del núcleo terrestre. Mediante el **intercambiador tierra-aire** de tipo superficial, se acondiciona el aire exterior antes de introducirlo en el interior del edificio. Este proceso se realiza captando la energía natural del suelo a través de pozos geotérmicos de baja potencia, también conocidos como pozos canadienses o provenzales, como sistema de apoyo para la climatización del aire que forma parte de la instalación de ventilación.

El intercambiador empleado en el diseño es de tipo superficial, por lo que es imprescindible tener en cuenta y conocer el comportamiento del terreno a esta profundidad. Teniendo en cuenta que a medida que se profundiza, el rango de temperaturas disminuye y hay un mayor desfase temporal. En los niveles más superficiales, hasta 1.5 metros, la temperatura del suelo está influenciada por las variaciones diarias de la temperatura ambiente.

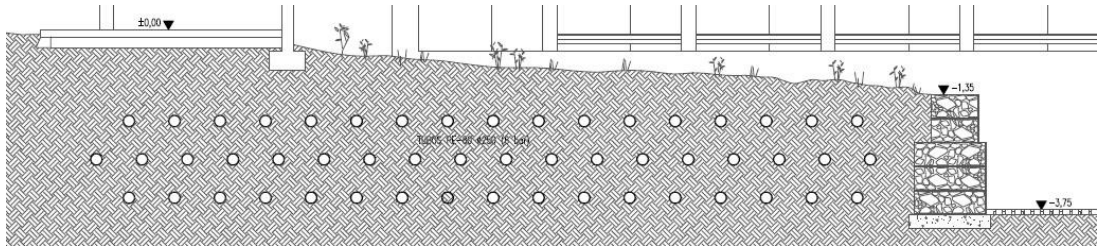
Este sistema, combinado con un recuperador entálpico, consiste en un sistema de aprovechamiento de geotermia (energía renovable) que hace circular el aire captado en el exterior, por tubos enterrados en paralelo, con una pendiente de 1%, a profundidades de 2,02m, 2,72m y 3,42 m (sistema de canalización) y de esta forma climatizar el aire previamente a su inclusión en el sistema de ventilación. Este enfoque se llama acondicionamiento pasivo, ya que minimiza el uso de otras formas de energía para climatizar el edificio, contribuyendo así a un consumo energético reducido.

El terreno en el que se encuentra el edificio LUCIA, presenta una extensión suficiente que permitió instalar 52 tubos geotérmicos de 18.00 m cada uno. Este sistema, además de fuente de energía renovable puede considerarse también un dispositivo climático.

En la tabla siguiente, se puede observar otros datos de interés de la instalación:

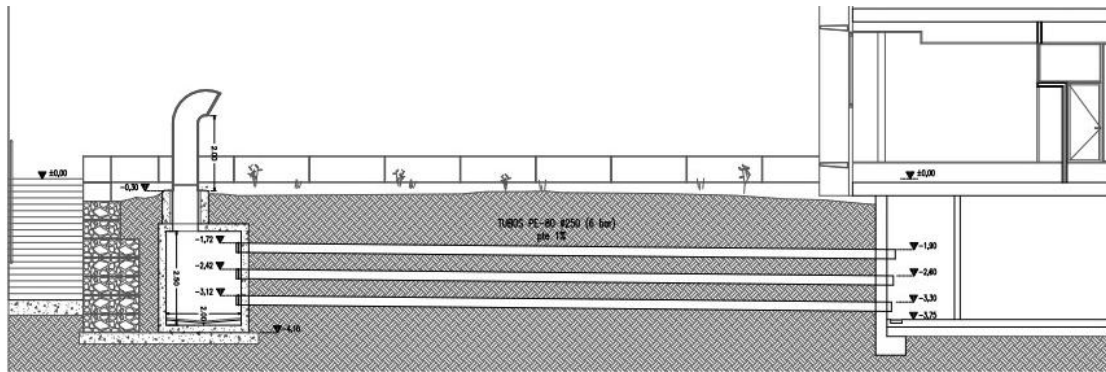
*Tabla 7. Datos de interés instalación geotermia.*

<b>Diámetro del tubo</b>	250 mm
<b>Espesor del tubo</b>	0,012 mm
<b>Resistencia térmica del tubo</b>	0,2 m <sup>2</sup> K/W
<b>Velocidad del aire</b>	2,00 m/s
<b>Caudal de los pozos</b>	14688 m <sup>3</sup> /h
<b>Potencia ventiladores</b>	1 ventilador de 3,9 kW a 400 V
<b>Potencia total producida</b>	31726 x 0,7 = 22208 kW/año



*Ilustración 25. Vista sección de tubos en el terreno*

La toma de aire se presenta visualmente en la *Ilustración 22*, compuesta por **tres tomas** individuales que captan aire del exterior. Este aire se canaliza a través de los tubos mencionados hacia una cámara designada, donde luego es extraído mediante ventiladores de impulsión hacia la unidad de climatización. Posteriormente, el aire tratado se distribuye para la ventilación del edificio.



*Ilustración 26. Plano descriptivo de la instalación. Corte vertical.*



*Ilustración 27. Instalación tubos geotérmicos enterrados. Fase construcción.*



*Ilustración 28. Tomas de aire sistema de geotermia.*



*Ilustración 29. Toma de aire sistema de geotermia. Fase construcción.*

El sistema utiliza una red de tuberías para hacer circular el aire precalentado como fluido caloportador (aire), optimizando factores como la sección y longitud de las tuberías, así como la velocidad del aire, con el fin de favorecer el rendimiento. Además, el dimensionamiento del EAHX está determinado, sobre todo, por los siguientes parámetros:

- Caudal volumétrico.
- Profundidad de montaje.
- Espacio disponible.
- Valores característicos del subsuelo.
- Caudal de aire necesario.
- Clima en el emplazamiento de la instalación.

Un aspecto muy importante a mencionar, es la adecuada elección de los **materiales** teniendo en cuenta la corrosión, resistencia mecánica, su permeabilidad o la rugosidad de las paredes. Este último aspecto puede influir negativamente en los cálculos hidráulicos, aunque se mejore el proceso de transferencia de calor.

Por otro lado, es preciso tener en cuenta que, para evitar posibles interferencias, se deben garantizar unas **distancias mínimas** entre tubos de forma que el terreno entre ellas sea suficiente.

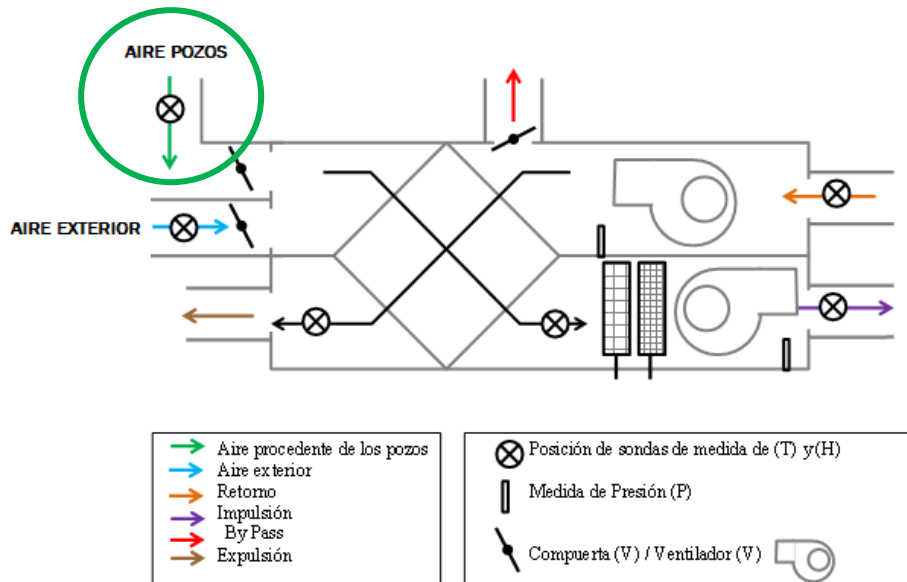
Para garantizar la calidad del aire, se emplean **filtros** adecuados y, al mismo tiempo, se previene la condensación con sistemas de drenaje.



*Ilustración 30. Salida tubos geotérmicos.*

Tal y como ha sido mencionado con anterioridad, el aire de entrada en la climatizadora o Unidad de Tratamiento de Aire (UTA) puede proceder de dos vertientes diferentes:

- Desde la pre-cámara del sistema **EAHX** (verde).
- Directamente del **exterior** (azul).



*Ilustración 31. Esquema UTA. EAHx. Fuente: Vegas Barbado, S. (2016). ESTUDIO DE UN RECUPERADOR DE ENERGÍA GEOTÉRMICA APLICADO A UN EDIFICIO UNIVERSITARIO. [Trabajo fin de Grado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid].*

Se debe tener en cuenta cuál es el modo de operación habitual de la instalación de ventilación del edificio LUCIA. A este respecto, cabe señalar que la posición de las compuertas de los conductos de **aire exterior** y **aire de los pozos** es fijada en función de las condiciones más favorables para la admisión de la UTA en cada instante. A objeto de garantizar un suministro de aire fresco adecuado, el funcionamiento del sistema contempla dos casos:

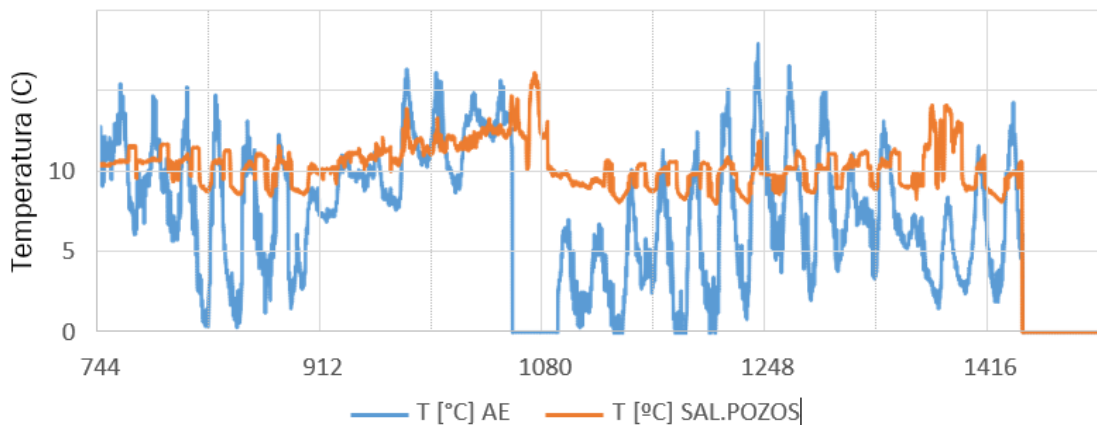
- Si las condiciones del **aire en los pozos** son mejores que las del exterior, la compuerta del sistema EAHX estará al **100%** y la del aire exterior se cerrará al menos al **15%**.
- Si las condiciones del **aire exterior** son mejores, la compuerta del aire exterior estará al **100%** y la del sistema EAHX se cerrará completamente.

Para este apartado, que se centra en el sistema EAHX, el segundo caso no es relevante.

En general, el sistema de pozos canadienses puede precalentar el aire exterior en invierno y enfriarlo en verano, lo que reduce la carga de calefacción y mantiene temperaturas frescas dentro del edificio, respectivamente. En general, se suele priorizar el empleo del sistema EAHX. Sin embargo, hay situaciones en las que el aire exterior puede estar más caliente o más frío que el aire pre-acondicionado por los pozos, en cuyo caso es preferible tomar aire directamente del exterior y omitir el sistema EAHX.

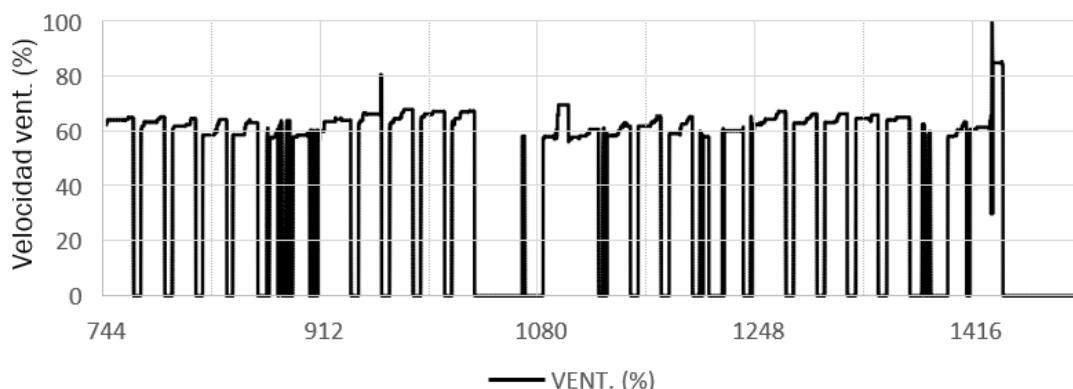
De esta manera, el sistema muestra un comportamiento coherente y eficiente, adaptándose a las condiciones cambiantes para optimizar el confort térmico y reducir el consumo de energía.

Por otro lado, a partir de los datos recopilados por el sistema SCADA del edificio relacionado con los pozos durante **julio 2015** y **febrero 2016**, se presenta información relevante para justificar el eficiente funcionamiento.



**Gráfico 18.** Resultado monitorización temperaturas. Febrero 2016. Fuente: Vegas Barbado, S. (2016). ESTUDIO DE UN RECUPERADOR DE ENERGÍA GEOTÉRMICA APLICADO A UN EDIFICIO UNIVERSITARIO. [Trabajo fin de Grado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid].

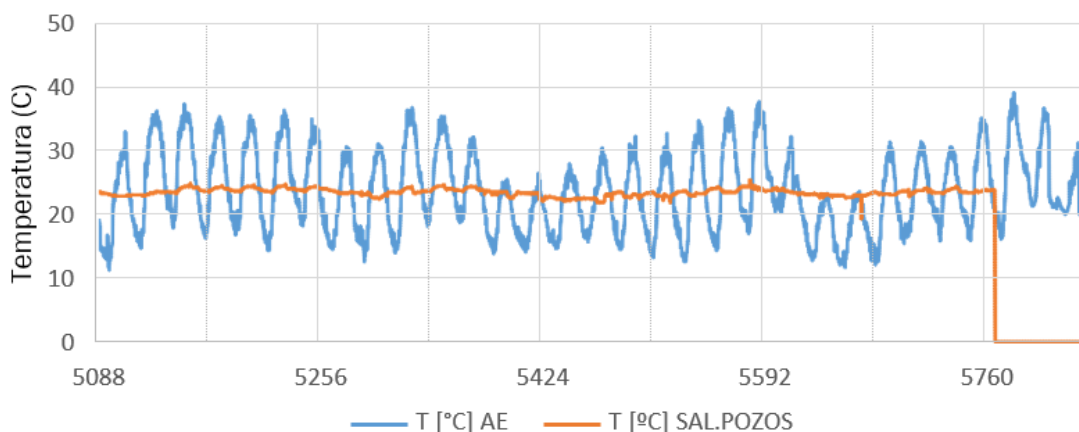
El análisis del *gráfico 18* revela la eficacia del sistema de pozos canadienses durante los meses de **invierno** (estudio realizado en el mes de febrero de 2016). La temperatura del aire extraído de los pozos es consistentemente **más alta** que la temperatura del aire exterior, lo que significa que el sistema de ventilación aprovecha eficientemente el calor del terreno para precalentar el aire de entrada al edificio.



**Gráfico 19.** Resultado monitorización velocidad de ventilación. Febrero 2016. Fuente: Vegas Barbado, S. (2016). ESTUDIO DE UN RECUPERADOR DE ENERGÍA GEOTÉRMICA APLICADO A UN EDIFICIO UNIVERSITARIO. [Trabajo fin de Grado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid].

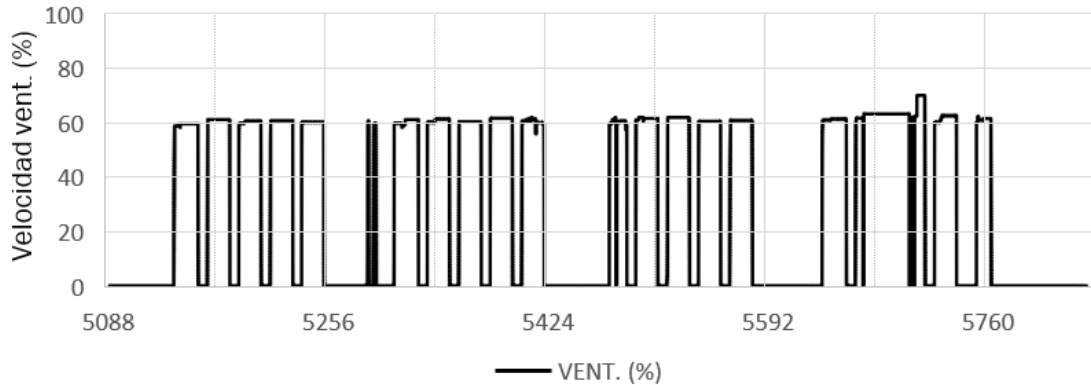
Además, el gráfico 19 de velocidad del ventilador, indica los momentos de funcionamiento del sistema de ventilación, con períodos de inactividad en el edificio durante los cuales el sistema no necesita proporcionar aire fresco al edificio.

Durante el **verano**, se sigue una filosofía similar a la del invierno, aprovechando el aire de los pozos cuando es más favorable que el aire exterior. Sin embargo, en verano, la prioridad es admitir aire a la Unidad de Tratamiento de Aire (UTA) a una temperatura **más baja** para satisfacer las demandas de enfriamiento del edificio, tal y como se puede observar en el gráfico 18.



**Gráfico 20.** Resultados monitorización temperaturas. Julio 2015. Fuente: Vegas Barbado, S. (2016). ESTUDIO DE UN RECUPERADOR DE ENERGÍA GEOTÉRMICA APLICADO A UN EDIFICIO UNIVERSITARIO. [Trabajo fin de Grado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid].

En el mes de julio de 2015, cuando las temperaturas exteriores oscilaban entre 30 y 40 °C, el sistema EAHX logró proporcionar aire limpio a temperaturas más frescas, alrededor de 22-25 °C, gracias al intercambio térmico con el terreno. Por lo tanto, el sistema de ventilación abría la compuerta del conducto asociado a los pozos durante la mayor parte del día, cerrándola solo en las primeras horas de la mañana cuando la temperatura exterior era más baja que la del aire de los pozos.



**Gráfico 21.** Resultado monitorización velocidad de ventilación. Agosto 2015. Fuente: Fuente: Vegas Barbado, S. (2016). ESTUDIO DE UN RECUPERADOR DE ENERGÍA GEOTÉRMICA APLICADO A UN EDIFICIO UNIVERSITARIO. [Trabajo fin de Grado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid].

El ventilador operó en un rango estrecho de velocidad, cerca del 60-65% de su velocidad máxima, para mantener un rendimiento óptimo.

Aunque el sistema puede no ser suficiente como calefacción, el rendimiento energético del intercambiador tierra-aire, resulta muy adecuado para aplicaciones de refrigeración. Además, el precalentamiento del aire ofrece un ahorro energético significativo.

Los datos recopilados en la *Tabla 8* muestran la cantidad de energía recuperada por el sistema geotérmico EAHX durante el transcurso de un año. Al realizar el *gráfico 20*, para observar estos resultados de una manera más visual, se entiende la importancia del EAHX durante los meses de alta demanda de refrigeración. En total, la recuperación geotérmica alcanza los 13,6 kWh/ m<sup>2</sup> durante sus 2209 horas de operación, considerando que el EAHX funciona el 35% del tiempo total de operación del edificio.



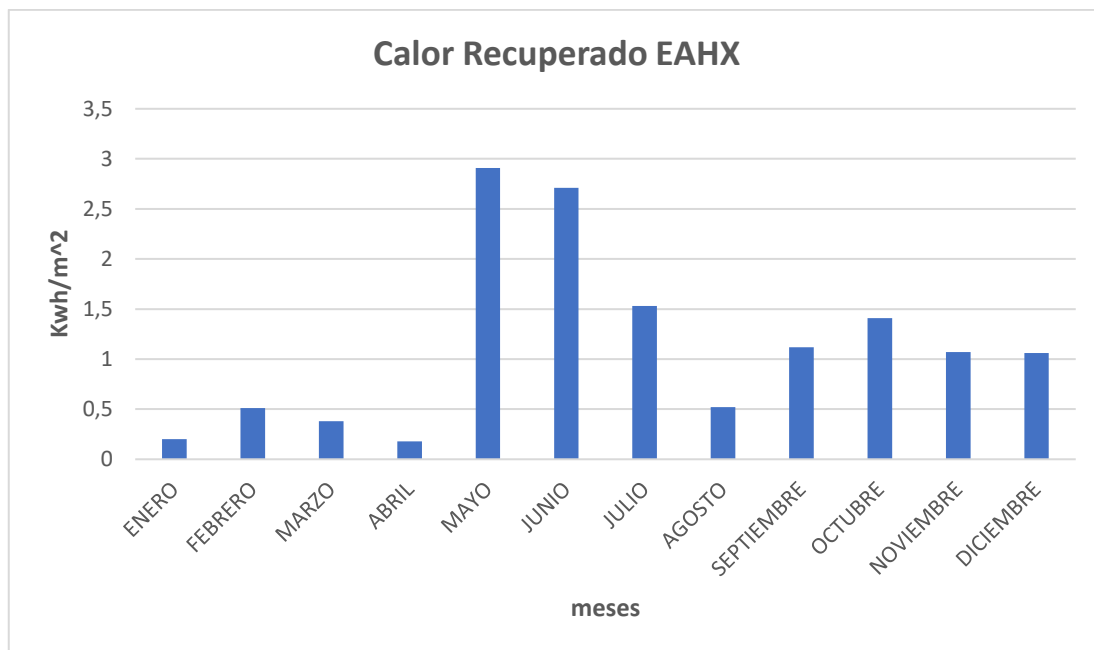


Gráfico 22. Calor recuperado por EAHX en Kwh. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Calor recuperado por EAHX y tiempo de funcionamiento.

	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	TOTAL
Calor recuperado(Kwh/m <sup>2</sup> )	0,2	0,51	0,38	0,18	2,91	2,71	1,53	0,52	1,12	1,41	1,07	1,06	13,6
Tiempo de funcionamiento (h)	152,25	162	206,5	148,75	212,25	247	203,5	99	188,25	220	217,25	152,25	2209

Se puede concluir que a través del sistema EAHX, se recuperan 362,000 KWh evitando de igual modo 73848 toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas a la atmósfera.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas se calculan multiplicando 204 g de CO<sub>2</sub>/ Kwh, por 362,000 kWh de energía recuperada, considerando el uso de gas natural como combustible fósil.

En la simulación del edificio se estimó un ahorro energético de 112,740 kWh al año, así como una reducción de 21 toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>. Comparando estos resultados con los datos reales, se evidencia que se han superado los estándares preestablecidos.

### 5.1.3. GESTIÓN DEL RECURSO AGUA

El Edificio LUCIA presenta un consumo de agua notablemente inferior al de un edificio de tamaño similar. Esto se debe al uso de elementos sanitarios de bajo consumo, la implementación de sistemas para reutilizar el agua de lluvia, de lavabos y duchas, y la ausencia de sistemas de riego. Estas medidas aseguran un consumo de agua excepcionalmente bajo en el edificio.

La incorporación de soluciones técnicas y el empleo de tecnologías innovadoras, permite garantizar el ahorro, reducir la generación de aguas residuales y el consumo de agua potable para el saneamiento del edificio en un 50%, mientras aumenta la recarga de los acuíferos locales.

Al mismo tiempo, se establecen los valores de referencia teniendo en cuenta los valores de caudal mínimos establecidos en el CTE.

#### - APROVECHAMIENTO DE AGUAS GRISES Y PLUVIALES

En el diseño de una instalación para la recuperación de aguas grises se deben considerar los siguientes conceptos básicos:

- Datos iniciales como la demanda de agua tratada, la producción de aguas grises, la calidad del agua de entrada y salida.
- Tipos de tratamiento.
- Recepción de aguas grises.
- Almacenamiento de agua tratada.
- Otras consideraciones del proceso

El diseño del edificio LUCIA comparado con otro edificio de referencia que carece de características de conservación de agua potable y reutilización de aguas grises, es superior. Según la tabla proporcionada a continuación, la reutilización de aguas grises en el edificio LUCIA representa un ahorro significativo de agua, específicamente 571 metros cúbicos, lo que equivale al 54% del total sin la implementación de estas medidas de reutilización. Esto sugiere que el diseño del edificio LUCIA es superior en términos de eficiencia en el uso del agua en comparación con el edificio de referencia.

**Tabla 9.** Volumen de suministro de agua. Fuente: Elaboración propia a partir de Valbuena García, F.J. (2016) Edificio Lucía: edificio para Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada. EdUVA.

APLICACIONES	EDIFICIO DE REFERENCIA	LUCIA NZEB
Fregadero del laboratorio	92,016 litros	92,016 litros
Lavabos, duchas	399,481 litros	399,481 litros
Urinarios de baños	571,368 litros	571,368 litros
Agua reutilizable	---	-571,368 litros
<b>TOTAL</b>	<b>1062,865 litros</b>	<b>491,497 litros</b>

Los criterios de diseño de las instalaciones de fontanería y saneamiento del edificio LUCIA son detallados y consideran varios factores importantes para garantizar la eficiencia y la adecuación a las necesidades del edificio y su entorno. A continuación, se muestran:

- Consideran una **ocupación máxima de 180 personas**: Este parámetro es fundamental para determinar las demandas de agua potable y la capacidad de las instalaciones de saneamiento. La cantidad de personas que ocuparán el edificio LUCIA en su máxima capacidad influye en la cantidad de agua que se requerirá para usos diarios como el consumo, y otras actividades.
- **El número de días hábiles es de 213 días**: Teniendo en cuenta los días hábiles, se pueden estimar con mayor precisión las demandas diarias de agua y las cargas sobre las instalaciones de saneamiento.
- **La precipitación media anual en la ciudad de Valladolid es de 435 mm/año**: La cantidad de precipitación media anual es importante para evaluar la disponibilidad de agua de lluvia que puede recolectarse y utilizarse para fines no potables, como riego de jardines o descargas de inodoros.
- **Los volúmenes de agua se calculan considerando**: Los volúmenes de agua necesarios se calculan teniendo en cuenta una serie de variables, como los usos por día (consumo de agua potable, descargas de inodoros, lavado de manos, etc.), la duración de estos usos, la concurrencia de usuarios (la cantidad de personas que usan el agua simultáneamente) y los coeficientes de filtrado que influyen en la cantidad de agua que se necesita para satisfacer las demandas y en la gestión del agua pluvial.

El diseño de las instalaciones sanitarias del edificio LUCIA incluye la implementación de aparatos sanitarios que cumplen con la normativa española CTE (Código Técnico de la Edificación) y van más allá al incorporar dispositivos de regulación de caudal. Estos dispositivos se instalan en todos los sanitarios del edificio y tienen la capacidad de ajustar los caudales de agua posteriormente, lo que significa que la cantidad de agua utilizada puede ser reducida según sea necesario. Esta regulación, se logra mediante la variación del tramo por el cual circula el agua en el dispositivo, lo que a su vez afecta al volumen de agua utilizado en cada uso. Estos dispositivos permiten controlar de manera más eficiente la cantidad de agua que se utiliza en los diferentes aparatos sanitarios del edificio LUCIA (tabla 9).

**Tabla 10.** dispositivos de flujo máximo. Fuente: Elaboración propia a partir de Valbuena García, F.J. (2016) Edificio Lucía: edificio para Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada. EdUVa.

APLICACIONES	CONSUMO DE AGUA
Baño	4,50 litros/uso
Urinarios	1,50 litros/uso
Lavabo	6,00 litros/uso
Fregadero laboratorio	8,00 litros/uso
Duchas	9,50 litros/uso
Grifo	9,00 litros/uso

Tal y como se puede observar en la *Tabla 10*, se deberán regular las griferías de los sanitarios en 6 litros/minuto y los fulxores para que garanticen un caudal máximo de 4,5 litros, en línea con el objetivo de cumplir con los valores de consumo LEED.

El diseño de la instalación de agua en el edificio LUCÍA, específicamente en el contexto del edificio nZEB (Edificio de Consumo de Energía Casi Nulo), se detalla en la *Ilustración 34*. En este diseño, se implementan dos circuitos de abastecimiento dentro del edificio:

- **Circuito uno:** Este circuito se origina en el embalse y recibe agua de la red de abastecimiento. Esta agua, se utiliza para dar servicio a las piletas de laboratorio, lavabos y duchas del edificio. En otras palabras, el circuito uno suministra agua potable para usos convencionales como higiene personal y limpieza en áreas específicas del edificio LUCÍA.
- **Circuito dos:** Este circuito comienza en un tanque de recolección que acumula aguas grises, agua de lluvia y aguas destiladas provenientes de la descontaminación del agua utilizada en las piletas de los laboratorios. Desde este tanque, el agua se distribuye para alimentar los baños y urinarios del edificio. En este caso, el circuito dos aprovecha el agua reciclada y recolectada, como las aguas grises y de lluvia, para usos no potables, como el uso en sanitarios, lo que contribuye a la conservación de agua potable y a la sostenibilidad del edificio.

El agua de lluvia que se recoge desde la planta cubierta del edificio, utilizando el sistema Geberit, se canaliza directamente hacia el pavimento poroso del sótano de la planta. Además de esta agua de lluvia, también se recolecta el agua filtrada en la zona de aparcamiento del edificio. Ambas corrientes de agua, la de lluvia y la filtrada, se acumulan en un pozo de drenaje específico. Este pozo de drenaje cumple una doble función: por un lado, sirve como un punto de recogida para el agua de lluvia y el agua filtrada y, por otro lado, actúa como soporte para la red de aguas grises del edificio.

Además, se implementa un sistema de aguas grises que tiene como objetivo recuperar y reutilizar el agua pluvial recogida. Esta agua pluvial recuperada se destina específicamente para su uso en los baños y urinarios del edificio. La finalidad principal es reducir el consumo de agua potable, aprovechando el agua de lluvia disponible para usos no potables. Con ello, se busca maximizar la eficiencia hídrica al reciclar el agua pluvial para aplicaciones que no requieren agua potable, lo que contribuye significativamente al ahorro de recursos.

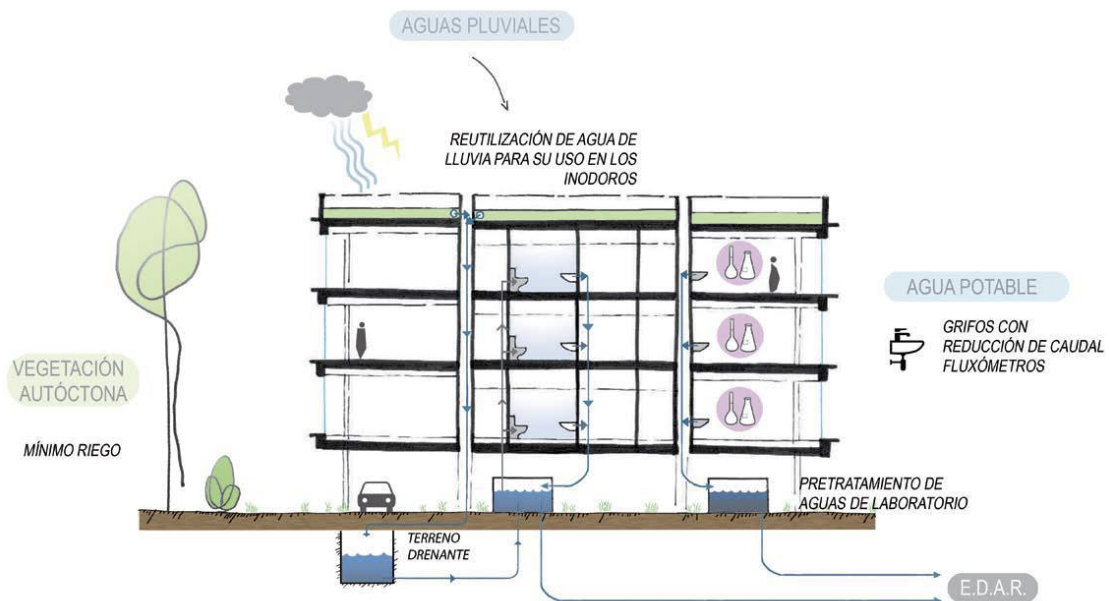
El proceso implica dirigir tanto el agua de lluvia como el agua de los lavabos y duchas hacia un tanque colector central. Posteriormente, esta agua, se traslada a un equipo compacto de tratamiento de aguas grises. En este equipo, se lleva a cabo un proceso de limpieza y desinfección del agua, eliminando contaminantes bacteriológicos y otros agentes nocivos. Una vez que el agua ha sido adecuadamente tratada, se permite que drene hacia el circuito de abastecimiento o suministro del edificio para su posterior uso.

Además, el agua tratada se almacena en un depósito designado, donde se mezcla con el agua descontaminada proveniente de los laboratorios. Este depósito asegura que el agua tratada esté disponible para ser utilizada de manera eficiente en las distintas aplicaciones dentro del edificio LUCÍA.

Por otro lado, se implementa un sistema de purificación de Oxidine. Este sistema tiene como objetivo purificar y desinfectar las aguas grises y pluviales para su posterior uso en inodoros y urinarios. El equipo de purificación está compuesto por varios componentes, que incluyen un grupo de bombeo para dirigir el agua hacia el sistema, sensores de medición para monitorear la calidad del agua en tiempo real, una membrana de filtración cerámica para eliminar impurezas y contaminantes, así como un prefiltro diseñado para retener sólidos gruesos y prevenir obstrucciones en el sistema.

Finalmente, se instalan dos dispositivos de presión, cada uno con dos bombas, para elevar el agua necesaria y abastecer los dos circuitos mencionados: el suministrado por la red de abastecimiento y el de aguas grises, pluviales y vertidos o desechos de laboratorio. Paralelamente, grupos de bombas de presión dirigen el agua hacia dos tanques de almacenamiento ubicados aguas abajo.

Una vez que el agua ha sido utilizada, tanto la suministrada como la reutilizada, se vierte en la red de alcantarillado o red de aguas residuales. Este proceso completa el ciclo del agua en el edificio LUCÍA, asegurando que se maneje de manera eficiente y sostenible, tanto en su suministro como en su disposición final.



*Ilustración 32. Diseño de instalación de agua en el LUCIA, nZEB. Valbuena García, F.J. (2016) Edificio Lucía: edificio para Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada. EdUVa.*

A objeto de minimizar el caudal de aguas residuales, se ha implementado una **planta depuradora**. En esta planta, el agua residual se recoge inicialmente en un tanque de 100 litros, donde se lleva a cabo un proceso de neutralización. Este proceso se realiza en un reactor equipado con un agitador y un medidor de pH para dosificar el reactivo necesario para alcanzar niveles seguros de acidez o alcalinidad.

Además, la planta depuradora cuenta con un circuito hidráulico que proporciona agua destilada de la lluvia, la cual puede ser reutilizada en cisternas y urinarios. También recibe un caudal de agua depurada de contaminantes originados en los laboratorios, que ha sido gestionado adecuadamente para su tratamiento.

La *Tabla 11* muestra el volumen máximo de agua reutilizable, proporcionando información sobre la cantidad de agua destilada de la lluvia y agua depurada de laboratorios que pueden ser utilizadas de manera eficiente en el edificio LUCIA.

*Tabla 11. Caudal máximo de agua reutilizable. Fuente: Valbuena García, F.J. (2016) Edificio Lucía: edificio para Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada. EdUVa.*

AGUA REUTILIZABLE	VOLUMEN ANUAL
Aguas grises: lavabos, duchas.	399,481 litros
Agua de la lluvia	383,400 litros
Agua piletas del laboratorio	82,814 litros
<b>TOTAL</b>	<b>865,695 litros</b>

Finalmente, el sistema de drenaje general del edificio permite que el agua con las heces sea conducida por gravedad hasta un pozo de la red. Este pozo actúa como punto de conexión entre la instalación de evacuación del edificio y la red de alcantarillado del Campus. Una vez en la red de alcantarillado municipal, aguas abajo, las aguas residuales se mezclan con otras provenientes de diversos colectores y son dirigidas hacia la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR).

En la EDAR, las aguas residuales son tratadas para eliminar contaminantes y residuos, asegurando que el agua devuelta al medio ambiente cumpla con los estándares ambientales requeridos. Este proceso cierra el ciclo del agua, contribuyendo a mejorar el entorno fluvial al garantizar que las aguas residuales sean tratadas adecuadamente antes de ser devueltas a la naturaleza.

El ciclo final del edificio LUCIA finaliza con el vertido al río Pisuerga.

Además de todas las medidas mencionadas anteriormente, es importante destacar el uso de materiales sostenibles y libres de halógenos en las tuberías del edificio LUCIA. Para el suministro de agua, se utiliza el polipropileno PPR, un material conocido por su durabilidad y resistencia, así como por ser respetuoso con el medio ambiente. Para las pequeñas redes de drenaje o evacuación, se emplea el polipropileno HT PHONO, otro material sostenible que cumple con los estándares de seguridad y calidad.

Estos materiales no solo garantizan un funcionamiento eficiente y duradero de las instalaciones de fontanería y saneamiento, sino que también contribuyen a la sostenibilidad del edificio al reducir el impacto ambiental y promover prácticas responsables en la construcción y mantenimiento de las infraestructuras.

Un aspecto crucial que caracteriza al edificio LUCIA es su enfoque en el ahorro energético. Es importante tener en cuenta que el ciclo del agua, desde su captación y transporte hasta los puntos de consumo, hasta su saneamiento, implica un consumo significativo de energía. La siguiente *Tabla 12* proporciona una estimación de los costos energéticos asociados con la fase de suministro y saneamiento del agua.

**Tabla 12.** Consumo energético del ciclo del agua. Fuente: Elaboración propia a partir de Valbuena García, F.J. (2016) Edificio Lucía: edificio para Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada. EdUVA.

	CONSUMO ENERGÉTICO, kW/m <sup>3</sup>
ENERGÍA DE ABASTECIMIENTO	1.89
ENERGÍA DE EVACUACIÓN	0.49
TOTAL	2.38

Si se compara un edificio estándar como referencia con un edificio de Consumo de Energía Casi Nulo (nZEB) como LUCIA utilizando los valores de costo de energía en kW/m<sup>3</sup> proporcionados en la *Tabla 13* y el volumen de suministro de agua en la *Tabla 9*, se pueden calcular los datos de consumo de energía en kW de cada edificio por año. Además, podemos determinar la diferencia de ahorro energético entre los dos edificios debido al Coeficiente de Eficiencia (CE) de gestión de aguas residuales implementado en el edificio LUCÍA.



Al mismo tiempo, con respecto a la reducción del consumo energético relacionado con el **abastecimiento**, se ha logrado una disminución del **54%**, según se muestra en la *Tabla 13*.

*Tabla 13. Consumo energético abastecimiento del ciclo del agua. Fuente: Elaboración propia a partir de Valbuena García, F.J. (2016) Edificio Lucía: edificio para Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada. EdUVa.*

	COSTE ENERGÉTICO	VOLÚMER, m <sup>3</sup>	CONSUMO KW
EDIFICIO DE REFERENCIA	1,89	1062,865	2008,81
EDIFICIO LUCIA	1,89	491.497	928,92
		DIFERENCIA	1079,89

En relación, a la reducción del consumo energético relacionado con el **saneamiento**, se ha conseguido disminuir un **46%**, *Tabla 14*.

*Tabla 14. Consumo energético saneamiento del ciclo del agua. Fuente: Elaboración propia a partir de Valbuena García, F.J. (2016) Edificio Lucía: edificio para Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada. EdUVa.*

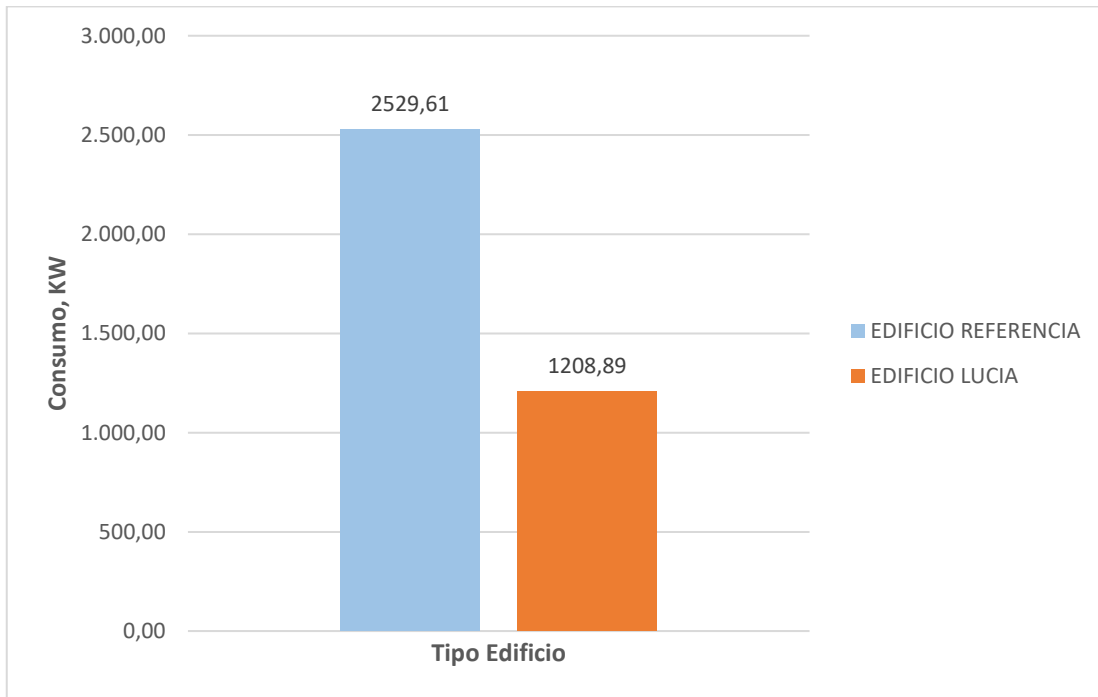
	COSTE ENERGÉTICO	VOLÚMEN, m <sup>3</sup>	CONSUMO KW
EDIFICIO DE REFERENCIA	0,49	1062,865	520,80
EDIFICIO LUCIA	0,49	571,368	279,97
		DIFERENCIA	240,83

Teniendo en cuenta el ciclo completo del agua, el consumo de energía se reduce en un **52%** en comparación con el edificio de referencia, como se puede ver en la siguiente *Tabla 15*.

**Tabla 15.** Energía almacenada en ciclo total del agua. Fuente: Elaboración propia a partir de Valbuena García, F.J. (2016) Edificio Lucía: edificio para Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada. EdUVa.

	CONSUMO, KW
EDIFICIO REFERENCIA	2529,61
EDIFICIO LUCIA	1208,89
DIFERENCIA	1320,72

Para observar esta significativa diferencia de una forma más visual, se puede hacer alusión al gráfico siguiente.



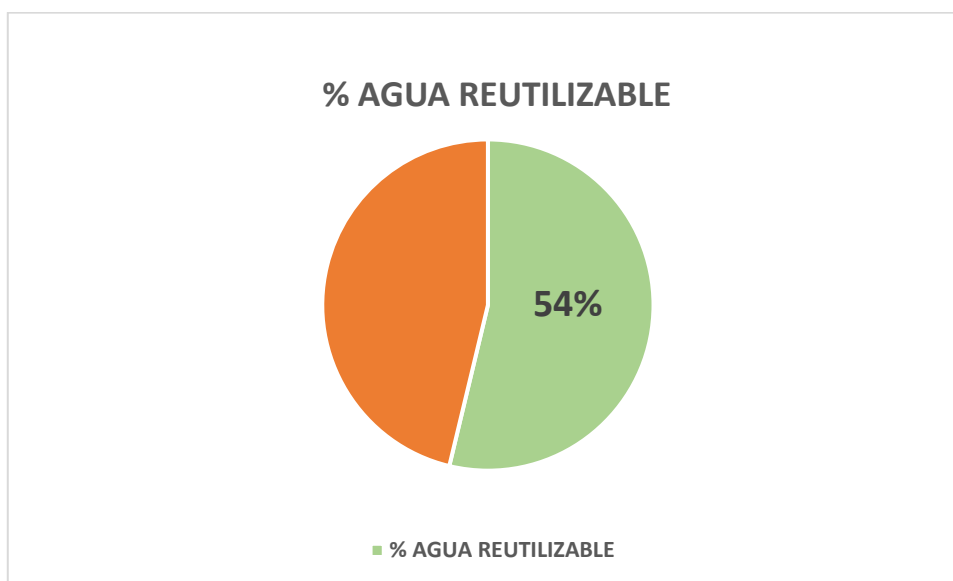
**Gráfico 23.** Energía almacenada en el ciclo del agua total. Fuente: Elaboración propia.

Si se considera que el consumo energético es íntegramente eléctrico y tenemos en cuenta los factores de energía primaria y CO<sub>2</sub> en España (2.403 kW de energía primaria total por kW de energía final y 0,357 kg de CO<sub>2</sub> por kW de energía final), se puede calcular el consumo total de energía primaria del edificio, así como la huella de carbono debido a las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por cada edificio a través del ciclo del agua. Las diferencias entre los dos edificios se obtienen de la misma manera. Todos estos valores se muestran en la *Tabla 16*.

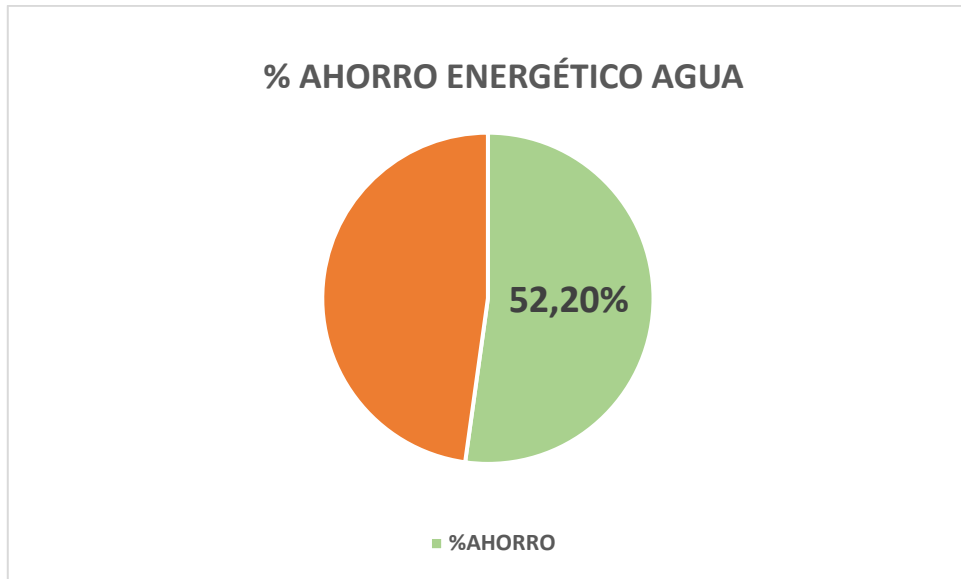
**Tabla 16.** Consumo de energía primaria total y emisiones de CO2

	ENERGÍA TOTAL	EMISIONES CO2
<b>EDIFICIO REFERENCIA</b>	6078,65	903,07
<b>EDIFICIO LUCIA</b>	2904,96	431,57
<b>DIFERENCIA %</b>	52,2%	52,2%

Todo esto, refleja el impacto significativo de las medidas de eficiencia energética en el ciclo del agua implementadas en el edificio LUCIA, especialmente en lo que respecta al manejo del agua y su tratamiento. Al mismo tiempo, hace que el edificio, en relación a la instalación de saneamiento, debido a la gestión de aguas grises tenga un menor consumo de agua potable. La reducción del consumo de energía en un 52% demuestra el éxito de las estrategias de diseño sostenible aplicadas en el edificio y su compromiso con la eficiencia energética y la conservación de recursos.



**Gráfico 24.** Porcentaje total de agua reutilizable. Fuente: Elaboración propia.



*Gráfico 25. Porcentaje ahorro energético agua. Fuente: Elaboración propia.*



## 6. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los objetivos establecidos para el desarrollo del proyecto, se pueden extraer una serie de **conclusiones** que se detallan a continuación.

En primer lugar, se ha demostrado que la adopción de prácticas más sostenibles en el sector de la construcción es fundamental para garantizar un uso más efectivo de los recursos naturales. Esto implica cambiar la mentalidad de la industria para que los materiales se reutilicen y reciclen en lugar de desecharse, lo que contribuye significativamente a la reducción del impacto ambiental.

Además, gracias al análisis cuantitativo de la economía circular centrado en los recursos naturales aplicados en el edificio LUCIA, se proporciona información valiosa sobre su desempeño y eficiencia en el uso de recursos. Esto sirve como caso de estudio para demostrar los beneficios de la implementación de prácticas sostenibles en la construcción.

La integración de estrategias y el diseño bioclimático supone una reducción significativa en la demanda energética. El empleo de energías renovables, de materiales sostenibles y una correcta gestión de los recursos ha convertido al edificio en un edificio casi nulo, nZEB.

El proyecto del edificio LUCIA ha demostrado ser un ejemplo a seguir en materia de sostenibilidad y eficiencia energética, logrando significativas mejoras en diversas áreas clave.

Por otro lado, se demuestra cómo la economía circular puede ser aplicada en todas las etapas del ciclo de vida de un edificio. Desde la fase de diseño, donde se seleccionan materiales de construcción sostenibles, hasta la fase operativa, donde se implementan sistemas y nuevas tecnologías para la recuperación y ahorro de agua y energía. Esta estrategia maximiza la eficiencia de los recursos y minimizar el desperdicio.

Por un lado, la demanda de productos que incluyen **materiales con baja energía incorporada** y con contenido reciclado se ha incrementado, reduciendo así el impacto ambiental asociado a la extracción y procesamiento de materias primas. Con ello, se ha alcanzado un reciclaje medio del 73,33% de los residuos materiales de construcción y demolición, promoviendo la economía circular y minimizando el impacto ambiental.

Además, el cemento utilizado en la construcción, fabricado, extraído y recuperado dentro de un radio menor de 800 km del lugar de construcción, cumple con el estándar LEED MR-5.1 para materiales regionales. Destacar, el uso de cemento PÓRTLAND tipo CEM II/A-V 42.5 R, con más del 15% de ceniza volante, el cual cumple con los estándares LEED para materiales reciclados.

El edificio LUCIA ha logrado una reducción de más del 70% en sus gastos de energía en comparación con un edificio convencional, superando los estándares LEED que promueven ahorros del 20% al 60%.

En este punto, destacar el **HVAC** como sistema de ventilación y climatización de aire primario, el cual ha obtenido la calificación energética A, presentando la capacidad de ajustar los consumos a las necesidades en cada momento. La implementación de un sistema de control inteligente en la estrategia de ventilación híbrida HVAC, supone un costo energético total de casi 5.000 euros al año, lo que conlleva ahorros económicos anuales del 55% en comparación con la ventilación estándar.

Como apoyo al sistema de ventilación y climatización se han instalado **tubos geotérmicos** que, mediante el intercambio energético tierra-aire, precalientan o enfrían el aire según las estaciones antes de entrar en el circuito. Su aporte de 25000KWh anuales reduce el consumo de electricidad para condicionar el aire interior. Este sistema de recuperación de calor geotérmico, ha reducido el uso de energía no renovable en un 31% y el impacto ambiental en un 90%. La integración de un sistema **EAHX**, basado en la recuperación geotérmica ha demostrado ser efectiva tanto para calefacción como para refrigeración, ahorrando energía (332.000 KWh/año), reduciendo las emisiones CO<sub>2</sub> (73848 toneladas CO<sub>2</sub>/año), y adaptándose a las condiciones cambiantes para mantener el confort térmico.

Destacar que genera el 50% de su energía total mediante fuentes renovables priorizando la biomasa, que es abundante en la UE y fomentando la economía circular. El empleo de estas fuentes de energía, ha supuesto una reducción de 150 toneladas de CO<sub>2</sub> eq/año, aunque no se consideran debido a su consideración neutral.

Gracias al empleo de este sistema de calefacción centralizada que satisface a otros 31 edificios de la universidad, se logra alcanzar un concepto de Campus de Energía Casi Nula, y aumentar el porcentaje de penetración de energías renovables.

Al mismo tiempo, se demuestra el éxito resultante de su integración, conforme a los estándares de la Unión Europea (UE) establecidos por la Directiva de Eficiencia Energética de Edificios (EPBD) y el proyecto LEVEL. Se ha enfocado en mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de carbono en edificios de alto consumo energético, alineándose con los objetivos de descarbonización de la UE para 2030-2050 y los estándares nZEB. Esta metodología innovadora ha demostrado ser efectiva en la evaluación del desempeño energético.

Además de estas estrategias, la implementación de medidas para reutilizar el 100% de las **aguas** grises ha ahorrado 571 metros cúbicos de agua, reduciendo el consumo energético relacionado con el abastecimiento en un 54% (1079,89 KW.), con el saneamiento en un 46% (240,83 KW) y con el ciclo completo del agua en un 52% (1320,72 KW). Al mismo tiempo, se ha eliminado completamente el daño a la vida acuática.

Todo ello, garantizando la salud y el bienestar para los usuarios. Según unos criterios de valoración se ha cuantificado en un 93,3 sobre 100, y con costes

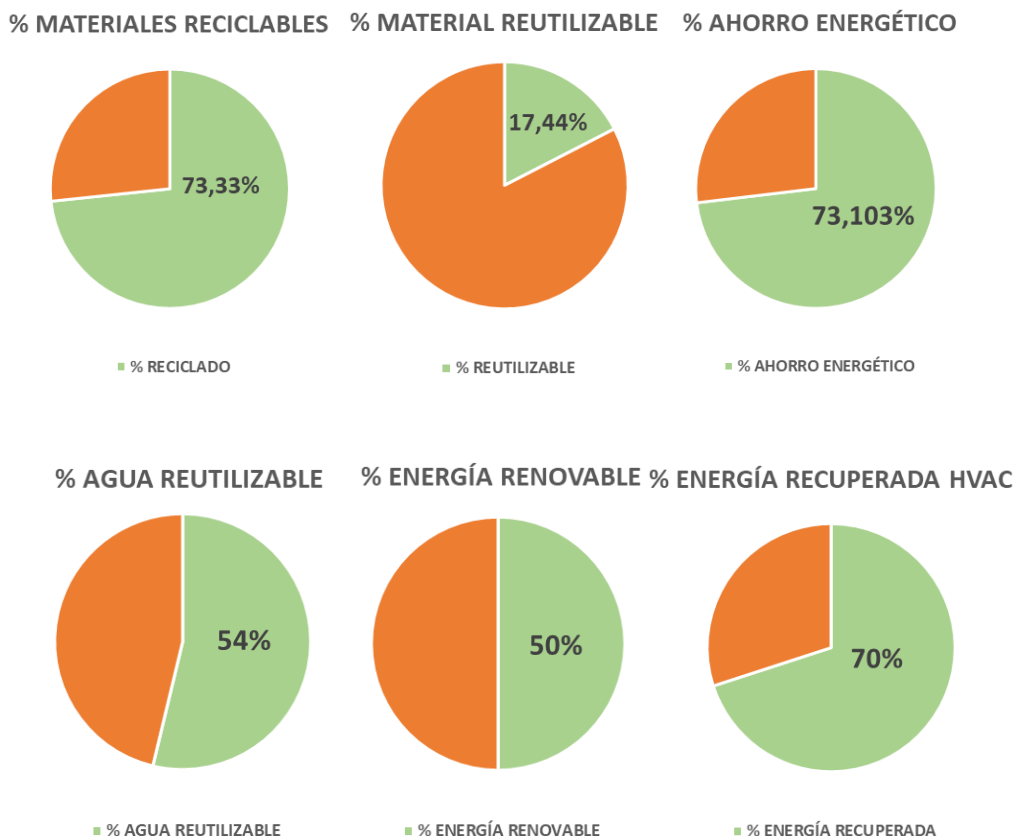
económicos muy reducidos, mostrados también mediante indicadores convenidos que presentan el mejor registro posible (100%).

En términos generales, se ha disminuido la demanda energética del edificio de 245 kWh/m<sup>2</sup>año a 65,90 kWh/m<sup>2</sup>año, lo que supone un ahorro energético del 73,103%, reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub> de 49,98 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> año a 13,4436 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>año.

El diseño integral ha permitido reducir en un 31% el inevitable agotamiento de los recursos no renovables, y en más de un 90% los impactos ambientales de la edificación.

Gracias a la mayor utilización de fuentes de energía renovables, la alineación con los objetivos de reducir las emisiones de carbono, y la comparación de los valores de los KPI, el edificio LUCIA a alcanzado la capacidad de poder definirse como un edificio nZEB, según el CTE español.

A continuación, se puede observar el porcentaje de materiales extraídos que son reciclables o reutilizables, el porcentaje de energía recuperada con la tecnología empleada, así como el porcentaje de agua reutilizable y las emisiones de gases de efecto invernadero equivalentes en CO<sub>2</sub> ahorrados del total.



**Gráfico 26.** Resumen porcentajes reciclaje, reutilización, ahorro y recuperación. Fuente: Elaboración propia.



En la *tabla 1* adjunta, se presenta una comparación detallada entre el edificio de referencia y el edificio objeto de estudio LUCIA, en relación con los recursos materiales de construcción, hídricos y energéticos evaluados en esta investigación.

**Tabla 17.** Consumo energético y emisiones CO2 evitadas. Fuente: Elaboración propia.

RECURSOS	Edificio de referencia		Edificio LUCIA		Diferencia		% AHORRO ENERGÉTICO	% REDUCCIÓN EMISIONES CO2
	Energético	Emisiones CO2	Energético	Emisiones CO2	Energético	Emisiones CO2		
Materiales	-	75,55	-	8,37	-	67,18	-	92,90%
Hídricos	2529,61kWh	903,07	1208,89	431,57	1320,72	471,5	52%	52,21%
Energéticos	245 kWh/m <sup>2</sup>	49,98 kg CO2/m <sup>2</sup>	65,90 kWh /m <sup>2</sup>	13,44 KgCO2/m <sup>2</sup>	179,1 kWh/m <sup>2</sup>	36,54 Kg CO2/m <sup>2</sup>	73,10%	73,10%
Renovables: biomasa	-	-	-	NEUTRO	-	NEUTRO	-	NEUTRO
Recuperación							70%	
HVAC								
EAHX								

Esta comparación permite cuantificar el porcentaje de ahorro energético y las emisiones evitadas a la atmósfera. Por otro lado, a partir de los documentos recogidos en la fase de diseño del edificio, se puede observar los indicadores relacionados con los materiales y el recurso hídrico. Se observan reducciones significativas en relación al impacto evitado, comparando el edificio LUCIA con un edificio de referencia (según CTE).

Por otro lado, se calculan los indicadores de sostenibilidad del ACV como son de cambio climático (potencial de calentamiento global KgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>-año, agotamiento de recursos de energía no renovable de energía primaria MJ y el agotamiento de aguas potables (m<sup>3</sup>), recomendados por la EU, como se muestran en la tabla 18.

Por otro lado, a partir de los documentos recogidos en la fase de diseño del edificio, se hace un análisis entre el edificio objeto LUCIA y el de referencia, evaluando la reducción de impacto en %. El resultado es que con los criterios de EC utilizados en el edificio LUCIA el valor de los tres indicadores de los recursos naturales analizados, representan una reducción del impacto mayor del 90% con respecto a un edificio de referencia.

**Tabla 18.** Resultados evaluación impacto ambiental LUCIA. Fuente: Departamento de Arquitectura de la UVA.

		Indicador/ m2 año	Edificio de Referencia	Edificio objeto	Impacto Evitado	% de Reducción de Impacto
1	Cambio Climático	kg CO2eq	75,55	8,37	67,18	92,90%
7	Agotamiento de energía no renovable, energía primaria	MJ	925,95	118,98	806,97	90,30%
9	Agotamiento de aguas potables	m3	0,34	-0,02	0,36	100,0%

El sistema SCADA, el cual controla de forma automática desde la central de producción de calor y frío, a la circulación de agua y los puntos de consumo interiores del edificio, constituye la principal herramienta de ahorro energético del edificio, programable y ajustable a los cambios de uso que se puedan dar en él.

Al mismo tiempo, se reduce el coste de operación y mantenimiento al pasar de sistemas individuales a un único sistema centralizado. La sustitución de los combustibles fósiles por biomasa forestal como fuente energética, supone una disminución notable de la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Además, genera empleo y actividad económica en Castilla y León y garantiza la adecuada conservación de las masas forestales.

En resumen, además de ser una infraestructura destinada a la investigación científica aplicada, ha supuesto un gran avance en la arquitectura sostenible, obteniendo múltiples premios y certificaciones, y siendo un gran referente mundial en material de sostenibilidad. Su diseño ha permitido que además de cumplir como edificio de consumo casi nulo se pueda integrar las herramientas de EC en los recursos naturales expuestos anteriormente logrando que este edificio tienda al nuevo concepto de la EPBD de edificio de emisiones cero ZEB. Es un claro ejemplo de que la autosuficiencia energética es posible desde un punto de vista tanto económico como técnico, combinado con una correcta gestión responsable de recursos.

Una **mejora** potencial que podría implementarse es la integración y utilización de los sistemas fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica, con el propósito de alimentar los sistemas de bombeo y ventilación requeridos para el funcionamiento del sistema de climatización HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado) y el sistema de calefacción urbana (DH), entre otros. Esta estrategia permitiría reducir aún más el consumo energético del edificio, al tiempo que se obtienen beneficios tanto económicos como ambientales adicionales.

## FUTUROS TRABAJOS:

En relación a **futuros proyectos**, es necesario estudiar el uso e implementación de diversas fuentes de energía renovable, como la energía eólica y el hidrógeno verde, para satisfacer las demandas crecientes de electricidad de manera sostenible y eficiente. Además, es crucial incrementar la financiación destinada a la investigación y desarrollo en el ámbito de la economía circular. Este enfoque estratégico no solo facilitará la identificación y el desarrollo de nuevas tecnologías, sino que también promoverá una significativa reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y del consumo energético global.

Por otro lado, la integración de nuevas herramientas de Análisis de Ciclo de Vida, adaptadas específicamente para edificaciones, jugará un papel fundamental en la optimización del impacto ambiental en los proyectos de construcción.

Además, es esencial proporcionar una formación exhaustiva a los profesionales involucrados directa o indirectamente en la industria de la construcción, respecto a los principios fundamentales de la economía circular. Esta capacitación abarca a los técnicos y especialistas encargados del desarrollo de proyectos, pero también a los usuarios finales, quienes desempeñan un papel crucial en la gestión sostenible de los recursos dentro de los edificios.

Adicionalmente, se debe intensificar el estudio de viabilidad sobre el aprovechamiento de residuos provenientes de otros sectores industriales, como el textil, con el propósito de reciclarlos y transformarlos en materiales destinados a la construcción, innovadores y sostenibles. Esta iniciativa contribuirá a reducir la dependencia de recursos naturales, fomentará la economía circular al cerrar el ciclo de vida de los materiales, y minimizará los residuos y las emisiones asociadas.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Arquitectura Sostenible. (2023, 7 de marzo). LUCIA, un edificio bioclimático de energía CERO. Arquitectura Sostenible. <https://arquitectura-sostenible.es/lucia-edificio-bioclimatico-energia-cero/>
- [2] AVEBIOM (2015, 6 de mayo). Edificio LUCIA: sostenibilidad, eficiencia y EERR. Issuu Inc. [https://issuu.com/avebiom/docs/edificio\\_lucia\\_en\\_bioenergy\\_interna](https://issuu.com/avebiom/docs/edificio_lucia_en_bioenergy_interna)
- [3] Comisión Europea. Hacia una economía circular: un programa de cero residuos para Europa. COM (2014) 398 final [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:50edd1fd-01ec-11e4-831f-01aa75ed71a1.0009.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:50edd1fd-01ec-11e4-831f-01aa75ed71a1.0009.02/DOC_1&format=PDF)
- [3] Departamento de Arquitectura de la Universidad de Valladolid.
- [4] Eco-Circular. (2021, 30 de julio) Economía Circular en la construcción: Estrategia para un entorno construido sostenible. Eco-Circular.com <https://eco-circular.com/2021/07/30/economia-circular-en-la-construccion-estrategia-para-un-entorno-construido-sostenible/>
- [5] Econova. Institute of Architecture & Engineering (2021, 8 de marzo). Pozo canadiense para calefacción. Econova. <https://econova-institute.com/pozo-canadiense-para-la-calefaccion/>
- [6] Edificio LUCIA - Universidad de Valladolid (s.f.). <http://edificio-lucia.blogspot.com.es/>
- [7] EDP Internacional AB. El sistema Internacional de DAP. Biblioteca EDP. <https://environdec.com/search>
- [8] EUROPA PRESS (S.f.). La primera piedra de la Calefacción de Distrito de la UVA se pondrá en diciembre, cuando se recibirá el edificio LUCIA. Teinteresa. [https://www.teinteresa.es/teinteresa/Calefaccion-Distrito-UVA-diciembre-LUCIA\\_0\\_1033097548.html](https://www.teinteresa.es/teinteresa/Calefaccion-Distrito-UVA-diciembre-LUCIA_0_1033097548.html)
- [9] Galindo Llorente, P. (2018). *Estudio del consumo energético en un District Heating (DH) de la Universidad de Valladolid* [Trabajo Fin de Grado. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales]. UVaDOC. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/28844>
- [10] GISCI-UPM. Economía circular. Universidad Politécnica de Madrid. <https://blogs.upm.es/gisci/economia-circular/>
- [11] González González, S.L, ZEB EDIFICIOS DE ENERGÍA CASI NULA. Grado en Ingeniería energética. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales.
- [12] GBCE. (2021) Economía circular en la edificación. green building council España. [https://gbce.es/documentos/Informe\\_Economia-Circular.pdf](https://gbce.es/documentos/Informe_Economia-Circular.pdf)

- [13] GreenGrowth. (2020) Manual para formadores: La Economía Circular Aplicada al Sector de la construcción.
- [14] HogarSense (2023, 25 de octubre). ¿Qué es un recuperador entálpico?: Usos y beneficios. <https://www.hogarsense.es/aire-acondicionado/recuperador-entalpico>
- [15] HVAC and Solar Energy Engineerring (2022, 13 de diciembre). Air Handling Unit (AHU). HVAC/R & Solar. [Air Handling Unit \(AHU\) - Equipments - HVAC/R & Solar \(hvac-eng.com\)](http://www.hvac-eng.com)
- [16] Inarquía (2022, 25 de octubre). El edificio LUCIA de la Universidad de Valladolid, considerado el más sostenible de Europa. Inarquía. <https://inarquia.es/obras/el-edificio-lucia-de-la-universidad-de-valladolid-considerado-el-mas-sostenible-de-europa/>
- [17] Instituto de Tecnología de la Construcción (2022, 6 de abril). Level(s), el marco europeo para edificios sostenibles. ITeC. [Level\(s\), el marco europeo para edificios sostenibles \(itec.es\)](http://www.itec.es)
- [18] Instituto Torroja TV (2014, 20 de mayo). Edificio LUCIA cero energía [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=hgXvYrdWSs4>
- [19] Imeida-Guzmán, M., & Díaz-Guevara, C. (2020). Economía circular, una estrategia para el desarrollo sostenible. Avances en Ecuador. Estudios De La Gestión: Revista Internacional De Administración, (8), 34–56. <https://doi.org/10.32719/25506641.2020.8.10>
- [20] Martín Sanz-García, J.R. (2017). *ANÁLISIS DE MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO (MAES), APLICABLES A UN EDIFICIO UNIVERSITARIO DE BAJO CONSUMO ENERGÉTICO*. [Trabajo Fin de Grado. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales]. UVaDOC. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/23082>
- [21] ONYX SOLAR. Universidad de Valladolid, Lucernario Fotovoltaico. Proyecto Onyx Solar. [Universidad de Valladolid - Edificio sostenible - Proyecto Onyx Solar](http://www.univalladolid.es)
- [22] Rahla, K. M., Mateus, R., & Bragança, L. (2021, 7 de abril). Implementing Circular Economy Strategies in Buildings - From Theory to Practice. Applied System Innovation, 4(2), 26. <https://doi.org/10.3390/asi4020026>
- [23] Recursos de la Biomasa (2013, 10 de diciembre). Fomento coloca La Primera Piedra del District Heating en la Universidad de Valladolid como punto de partida del nuevo proyecto. GESDINET. <https://recursosdelabiomasa.es/noticia/fomento-coloca-la-primera-piedra-del-district-heating-en-la-universidad-de-valladolid-como-punto-de-partida-del-nuevo-proyecto>
- [24] Rey Hernández, J. M.; Tejero-González, A.; Velasco-Gómez, E.; San José Alonso, J. F.s.; Rey Martínez, F. J.; & Esquivias, P. M. (2021). IAQ improvement

by smart ventilation combined with Geothermal Renewable Energy at NZEB. Environ. Sci. Proc. 2021, 9, 7. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2021009007>

[25] Rey Martínez, F. J., Rey Hernández, J.M., Yousif, C., Krawczyk D.A., (2023). Assessing the performance of a renewable District. Heating System to achieve nearly zero-energy status in renovated university campuses: A case study for Spain. ELSEVIER, 13. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117439>

[26] Rey-Hernández, J. M., San José Alonso, J. F., Velasco Gómez, E., Yousif, C., y Rey Martínez, F. J. (2020). Performance analysis of a hybrid ventilation system in a near zero energy building. Building and Environment 185 2020, 107265. ELSEVIER, 12 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107265>

[27] Rey-Hernández, J.M. (2019). *Energy and Environmental Sustainability of a Zero.Energy & Zero-Carbon Building*. [Tesis de Doctorado, Escuela de Doctorado Universidad de Valladolid].

[28] Tejero-González, A., Krawczyk, D.A., Martín Sanz-García, Rey Martínez, F. J., Velasco Gómez, E., (2019). Improved Performance of a PV Integrated Ventilated Façade at an Existing Nzeb. Energies, 12(15), 3033. <https://doi.org/10.3390/en12153033>

[29] UVa\_Online (2020, 21 de septiembre). RED DE CALOR CON BIOMASA FORESTAL DE LA UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=NRsH6UTUXew>

[30] Valbuena García, F. y González Díaz, M.J. (2016, 29 de abril). LUCIA (Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada). Construcion21. <https://www.construcion21.org/espana/case-studies/h/lucia-lanzadera-universitaria-de-centros-de-investigacion-aplicada.html>

[31] Valbuena García, F.J. (2016) Edificio Lucía: edificio para Lanzadera Universitaria de Centros de Investigación Aplicada. EdUva.

[32] Varios autores. *Economía circular en el sector de la construcción. Grupo de trabajo GT-6 Congreso Nacional del Medioambiente, CONAMA 2018*. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/130254/CONAMA\\_Economia%20circular\\_2018.pdf;sequence=1](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/130254/CONAMA_Economia%20circular_2018.pdf;sequence=1)

[33] Economía circular en el sector de la construcción. Grupo de trabajo GT-6 Congreso Nacional del Medioambiente 2018

[34] Vegas Barbado, S. (2016). *ESTUDIO DE UN RECUPERADOR DE ENERGÍA GEOTÉRMICA APLICADO A UN EDIFICIO UNIVERSITARIO*. [Trabajo fin de Grado, Escuela de Ingenierías Industriales, universidad de Valladolid].



# ANEXOS



## ANEXO 1: ENERGÍA FOTOVOLTAICA

La **integración fotovoltaica arquitectónica** (BIPV) implica utilizar materiales de construcción con capacidades fotovoltaicas, lo que permite al edificio generar electricidad a partir de la luz solar. Esto significa que partes de la estructura del edificio, como las fachadas, los muros o incluso elementos exteriores como pérgolas o pavimentos, pueden funcionar como generadores de energía eléctrica. Esta integración no solo reduce la necesidad de energía externa, sino que también contribuye a la sostenibilidad del edificio al aprovechar una fuente de energía renovable y respetuosa con el medio ambiente.

Al mismo tiempo, además de generar electricidad, ofrece una serie de ventajas adicionales. Estas incluyen mejoras en el aislamiento térmico y acústico, el aprovechamiento de la iluminación natural y la contribución a una imagen moderna e innovadora del edificio. De esta manera, la integración fotovoltaica no solo cumple con objetivos energéticos, sino que también mejora significativamente el confort y la estética del entorno construido.

El edificio incorpora sistemas fotovoltaicos integrados en dos espacios: dos lucernarios y el muro cortina de doble piel en la fachada Sur-Este. Este diseño permite filtrar la luz natural al interior. La fachada de doble piel produce **5.000 kW/año** y los lucernarios **5.500 kWh/año**, lo que implica un ahorro de 3.570 euros al año.

El edificio LUCIA cuenta con dos **lucernarios** ubicados sobre los núcleos de escaleras principales, donde se ha implementado vidrio fotovoltaico en lugar del vidrio convencional. Estos lucernarios permiten la entrada de luz natural desde el exterior. Esta estrategia de aprovechamiento de la luz natural en diversas áreas del edificio resulta en una notable reducción en la demanda de electricidad. Además, se configuran para satisfacer las necesidades de diseño pasivo incorporando elementos para facilitar la ventilación cruzada y contarán con canalón y pendiente para favorecer la evacuación de las aguas pluviales para su posterior reutilización.



*Ilustración 33. Lucernarios*

El vidrio fotovoltaico de **tecnología de silicio amorfo**, utilizado en la parte exterior de los lucernarios, actúa como un filtro que absorbe la radiación ultravioleta. Esta tecnología, permite variar la transparencia desde el 0% hasta el 40%, teniendo en cuenta que, a mayor transparencia, menor potencia del vidrio.

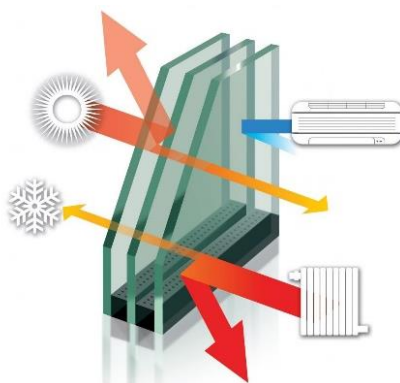
La base de silicio amorfo también actúa como filtro de las radiaciones infrarrojas, evitando en gran medida el efecto invernadero que los acristalamientos suelen provocar. A menor transparencia, menor sobrecalentamiento interior. En los lucernarios, teniendo en cuenta que el sol se encuentra muy alto, casi vertical, se necesita un grado de transparencia menor, que absorba en mayor medida la radiación solar.

En el edificio caso de estudio, se ha empleado una transparencia del **10%**, y una potencia de **165 Wp**, garantizando un ambiente interior luminoso y agradable, además de proteger la durabilidad de los materiales del edificio.



*Ilustración 34. Tecnología vidrio fotovoltaico transparente.*

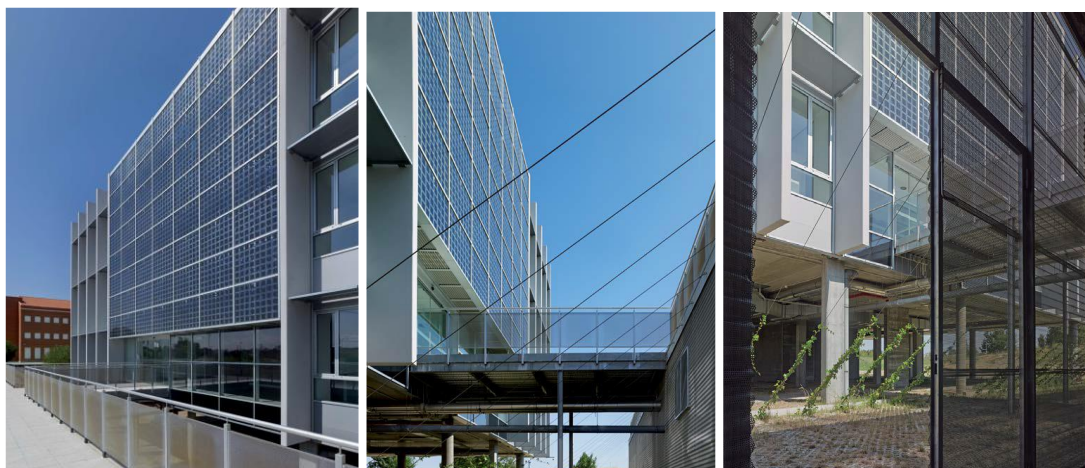
Para mejorar aún más el confort térmico, se ha utilizado **triple vidrio laminado** con **cámara de aire** (actuando como barrera que dificulta el paso de energía) y **doble laminado** interior de baja emisividad en los lucernarios (conlleva que las radiaciones de longitud de onda larga procedentes de fuentes de calor se reflejen en el acristalamiento y vuelvan al interior). De este modo, el valor de transmitancia térmica resultante es muy bajo ( $U=1,7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ), y se consigue mejorar el aislamiento térmico y reducir la transmisión de calor, lo que disminuye la necesidad de calefacción y refrigeración.



*Ilustración 35. Triple vidrio laminado*

Además, se fomenta la ventilación nocturna para el enfriamiento pasivo, sobre todo durante el verano, permitiendo una ventilación cruzada que puede ayudar al enfriamiento del edificio en las horas nocturnas. La producción anual de electricidad alcanza los **5,500 kWh** (lo que equivale a 277.600 horas de luz), contribuyendo al equilibrio energético del edificio, mientras se evitan 3.7 toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> al año, según el informe de la IEA para España. El enfoque de autoconsumo directo sin acumulación permite utilizar la energía generada en el mismo edificio, y contribuye al balance cero del edificio. Se ha priorizado la selección de materiales reciclados y locales para reducir la huella ecológica de la construcción.

Todas estas características han contribuido a la obtención de la certificación del edificio como LEED Platino, y a reducir la energía en todas las fases de vida del edificio, mejorando el impacto ecológico.



*Ilustración 36. Panel solar fachada sur*

La integración de una doble piel fotovoltaica en la fachada Sur, supone su adaptación a las energías renovables en el edificio LUCIA, mejorando la eficiencia energética y generando electricidad. Por ello, se identifican los aspectos clave del diseño óptimo, validando su viabilidad para una correcta implementación en la obra. Permite evitar la ganancia solar térmica en verano y la favorece en invierno.

A partir de un estudio realizado, se obtuvo que los resultados indican que, durante el invierno, es beneficioso mantener cerradas las compuertas para permitir que la fachada del edificio actúe como un aislante adicional cuando la temperatura exterior sea inferior a 18,4 °C.

El estudio de la distancia óptima entre las dos pieles de la fachada, supuso una separación de 103cm entre ambas. Además, la configuración de doble piel con aberturas longitudinales superiores e inferiores supone una mayor eficiencia, tanto en consumo de energía (25.56 kWh/m<sup>2</sup>) como en producción fotovoltaica (producción FV 9256 kWh).

Por otro lado, se integra un **sistema evaporativo** para la refrigeración de la cámara con el fin de mejorar el balance energético en verano y la eficiencia de los paneles fotovoltaicos.