



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE INTEGRAR
TECNOLOGÍA DIRECT AIR CAPTURE (DAC) EN
SISTEMAS HVAC: *Evaluación Técnica y Económica
para la Mejora de la Calidad del Aire y la
Sostenibilidad*

Autor: David Puelles Sánchez

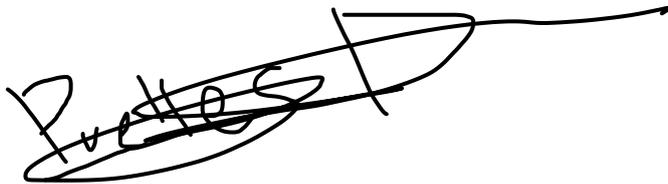
Director: Luis Diego Servín Lee

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Análisis de la Viabilidad de Integrar Tecnología Direct Air Capture (DAC) en Sistemas
HVAC: *Evaluación Técnica y Económica para la Mejora de la Calidad del Aire y la
Sostenibilidad*

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2023/24 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: David Puelles Sánchez

Fecha: 21/ 08/ 2024

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Luis Diego Servín Lee

Fecha: 23/ 08/ 2024





MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE INTEGRAR
TECNOLOGÍA DIRECT AIR CAPTURE (DAC) EN
SISTEMAS HVAC: *Evaluación Técnica y Económica
para la Mejora de la Calidad del Aire y la
Sostenibilidad*

Autor: David Puelles Sánchez

Director: Luis Diego Servín Lee

Madrid

Agradecimientos

Agradezco a mi tutor, Diego Servín, por su orientación y constante apoyo a lo largo de todo el proceso. También me gustaría agradecer a Aire Limpio por darme la oportunidad de colaborar con ellos y permitirme desarrollar este trabajo en un entorno profesional tan enriquecedor.

A mi familia y amigos, gracias por vuestra comprensión y apoyo constante. Habéis sido muy importantes en todo momento, brindándome la motivación necesaria para estos seis largos años de formación.

A todos, muchas gracias por acompañarme en este viaje.

ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE INTEGRAR TECNOLOGÍA DIRECT AIR CAPTURE (DAC) EN SISTEMAS HVAC: *EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA LA MEJORA DE LA CALIDAD DEL AIRE Y LA SOSTENIBILIDAD*

Autor: Puelles Sánchez, David.

Director: Servín Lee, Luis Diego.

Entidad Colaboradora: Aire Limpio

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto investiga la viabilidad técnica y económica de integrar tecnología de Captura Directa del Aire (DAC) en sistemas de climatización (HVAC) de edificios, con el objetivo de reducir la huella de carbono en entornos urbanos. Tras un exhaustivo análisis de diferentes tecnologías DAC, se optó por un módulo S-DAC de adsorbente sólido debido a su alta modularidad y compatibilidad con los sistemas HVAC existentes. El módulo desarrollado, de tamaño compacto, está diseñado para operar en tres ciclos diarios y puede instalarse en hasta 40 unidades por edificio, logrando una captura de 1 tonelada de CO₂ al año por módulo. A lo largo del proyecto, se analizará el rendimiento energético y económico de esta solución, así como su alineación con las normativas europeas de descarbonización, con el fin de evaluar su potencial como una herramienta eficaz y sostenible para la reducción de emisiones en edificios.

Palabras clave: Descarbonización, captura de CO₂, DAC, LCOD, sostenibilidad

Introducción

El proyecto se centra en la integración de tecnología de Captura Directa del Aire (DAC) en sistemas de climatización (HVAC) de edificios comerciales y residenciales. Dado que los edificios son responsables de aproximadamente el 40% del consumo energético y el 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la Unión Europea, la implementación de soluciones sostenibles y de baja emisión es crucial para alcanzar los objetivos de descarbonización establecidos en la legislación europea, como la Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios (EPBD).

El objetivo principal del proyecto es estudiar la viabilidad técnica y económica de la implementación eficaz de tecnología DAC en sistemas HVAC existentes, aportando emisiones negativas al ambiente y, por tanto, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono de los edificios.

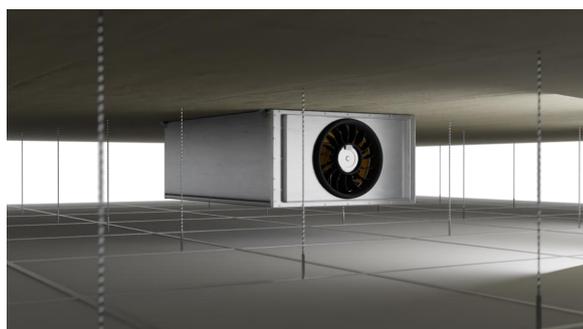
Estudio de Tecnologías DAC

Primeramente, se realizó un estudio exhaustivo de las tecnologías DAC disponibles para determinar la opción más adecuada para integrar en sistemas HVAC de edificios. Las dos principales tecnologías evaluadas, el resto se descartaron por su bajo nivel de madurez tecnológica, fueron la adsorción sólida (S-DAC) y la absorción líquida (L-DAC).

Se optó por escoger la tecnología S-DAC con adsorbente sólido debido a su mayor flexibilidad y compatibilidad con los sistemas HVAC existentes en edificios gracias a su alta modularidad. La tecnología L-DAC fue descartada principalmente por su menor adaptabilidad a entornos urbanos y la necesidad de instalaciones más grandes, lo que la hacía menos viable para este tipo de aplicación específica además de otros factores como su alto consumo de agua y su alta temperatura necesaria en la regeneración del adsorbente.

Diseño y Desarrollo del Módulo S-DAC

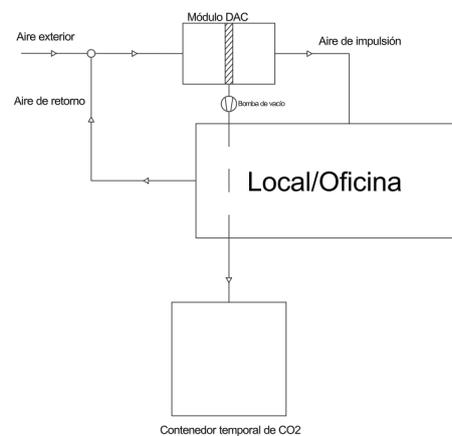
El proyecto ha desarrollado un módulo S-DAC de tamaño reducido y altamente modular, diseñado para integrarse en sistemas HVAC sin necesidad de realizar modificaciones extensivas en la infraestructura existente. El nuevo módulo, con dimensiones de aproximadamente 0,4x0,7x1 m, es considerablemente más pequeño que los modelos comerciales disponibles, lo que permite una instalación más rápida y económica. Este diseño modular permite una instalación media estimada de 40 módulos por edificio, lo que incrementa significativamente la capacidad total de captura de CO₂.



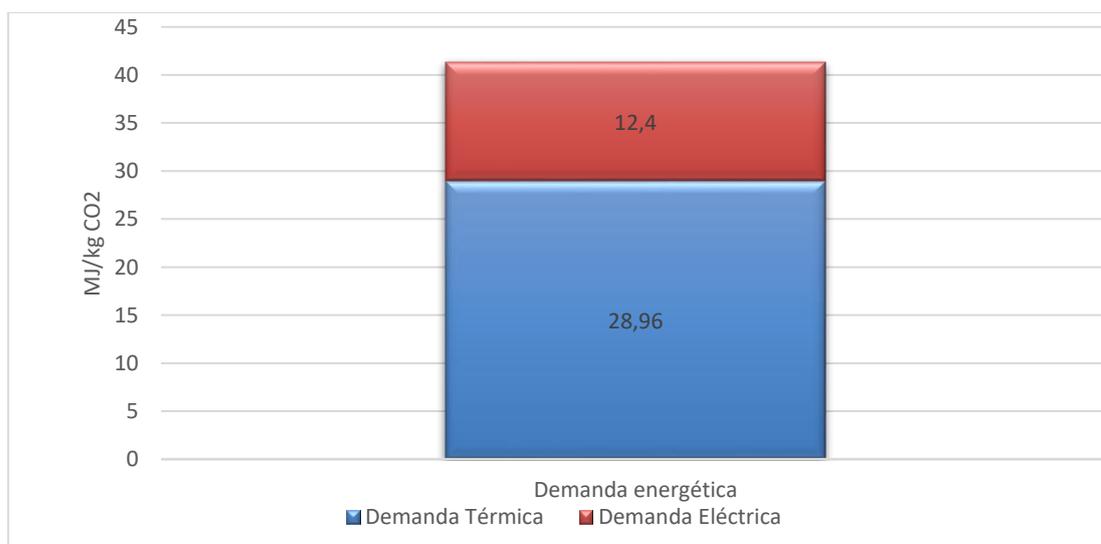
El módulo S-DAC utiliza un adsorbente funcionalizado con aminas, que ha demostrado ser altamente eficiente en la captura de CO₂. El ciclo de operación del módulo se basa en un proceso de desorción-regeneración TVSA (Temperature-Vacuum Swing Adsorption), que realiza 3 ciclos diarios, logrando una capacidad de captura de aproximadamente 1 tonelada de CO₂ al año por módulo.

Viabilidad Técnica

El análisis técnico del proyecto muestra que la implementación del módulo S-DAC es viable tanto desde un punto de vista de diseño como de operación. El sistema se conecta al conducto de aire exterior y al aire de retorno del edificio, lo que permite capturar CO₂ de una corriente de aire con una mayor concentración de este gas (800-1000 ppm en el aire de retorno frente a 400-500 ppm en el aire exterior). Esta configuración no solo mejora la eficiencia de captura, sino que también optimiza el uso de energía del sistema HVAC, reduciendo la necesidad de ventilación continua y, por lo tanto, el consumo energético.

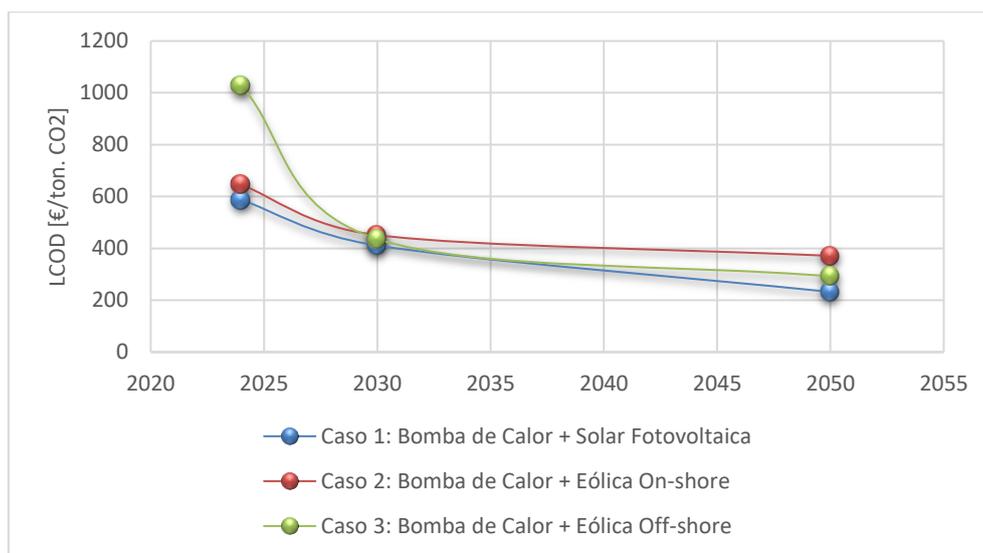


Se ha calculado por separado la demanda de energía térmica (principalmente afectada por el proceso de regeneración del adsorbente, a 100°C) y la demanda de energía eléctrica (bomba de vacío,), obteniendo los siguientes valores para el caso de implementación de 40 módulos:



Viabilidad Económica

Se ha llevado a cabo el estudio actual además de la proyección a 2030 y 2050 del LCO_D (*Levelized Cost of DAC*) para tres casos de aprovechamiento energético diferente: Bomba de Calor + Solar Fotovoltaica, Bomba de Calor + Eólica On-shore y Bomba de Calor + Eólica Off-shore; y se han obtenido los siguientes resultados:



Estas cifras muestran que, a medida que la tecnología se desarrolla y escala, el costo de captura de CO₂ mediante este sistema se volverá cada vez más competitivo, especialmente frente a otras tecnologías de reducción de emisiones.

Para el Caso 1, el proyecto ha demostrado ser viable a largo plazo, con indicadores financieros positivos. El análisis financiero muestra un VAN de 672,92 € y una TIR del 8,30%; recuperando la inversión a partir de los 14 años. Estos resultados indican que el proyecto no solo es rentable, sino que también es atractivo para la inversión, especialmente considerando la posibilidad de recibir subvenciones del Innovation Fund de la Unión Europea, que puede cubrir hasta el 60% de los costos iniciales.

Alineación Regulatoria-Ambiental

El proyecto está alineado con la Taxonomía Europea, cumpliendo con los criterios de sostenibilidad que promueven inversiones en tecnologías que contribuyen significativamente a la mitigación del cambio climático. Al capturar CO₂ directamente del aire y reducir las emisiones netas de GEI, el módulo S-DAC contribuye a los objetivos de descarbonización establecidos por la UE. Además, la integración del sistema en edificios

ayuda a cumplir con los requisitos de la EPBD, que exige mejoras en la eficiencia energética y la reducción de emisiones en el sector de la construcción.

Conclusión

En resumen, el proyecto demuestra la viabilidad técnica, económica y regulatoria de integrar tecnología DAC en sistemas HVAC de edificios. El desarrollo de un módulo más pequeño y modular no solo facilita su implementación y reduce los costes de instalación, sino que también mejora la eficiencia de captura de CO₂, contribuyendo de manera efectiva a la descarbonización del parque inmobiliario. Con un fuerte alineamiento con las normativas europeas, el proyecto se posiciona como una solución innovadora y sostenible para reducir las emisiones de CO₂ en edificios, respaldado por indicadores financieros positivos y un diseño que maximiza la eficiencia energética.

ANALYSIS OF THE FEASIBILITY OF INTEGRATING DIRECT AIR CAPTURE (DAC) TECHNOLOGY IN HVAC SYSTEMS: *TECHNICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT FOR AIR QUALITY AND SUSTAINABILITY IMPROVEMENT*

Author: Puelles Sánchez, David.

Supervisor: Servín Lee, Luis Diego.

Collaborating Entity: Aire Limpio

ABSTRACT

This project investigates the technical and economic feasibility of integrating Direct Air Capture (DAC) technology into HVAC systems in buildings, with the aim of reducing the carbon footprint in urban environments. After a thorough analysis of different DAC technologies, a solid adsorbent S-DAC module was chosen due to its high modularity and compatibility with existing HVAC systems. The developed module, compact in size, is designed to operate in three daily cycles and can be installed in up to 40 units per building, achieving a capture of 1 tonne of CO₂ per year per module. Throughout the project, the energy and economic performance of this solution will be analysed, as well as its alignment with European decarbonisation regulations, in order to assess its potential as an effective and sustainable tool for reducing emissions in buildings.

Keywords: Decarbonization, CO₂ capture, DAC, LCOD, sustainability

Introduction

The project focuses on the integration of Direct Air Capture (DAC) technology in HVAC systems in commercial and residential buildings. As buildings are responsible for approximately 40% of energy consumption and 36% of greenhouse gas (GHG) emissions in the European Union, the implementation of sustainable and low-emission solutions is crucial to achieve the decarbonization targets set in European legislation, such as the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD).

The main objective of the project is to study the technical and economic feasibility of the effective implementation of DAC technology in existing HVAC systems, providing negative emissions to the environment and, therefore, contributing to the reduction of the carbon footprint of buildings.

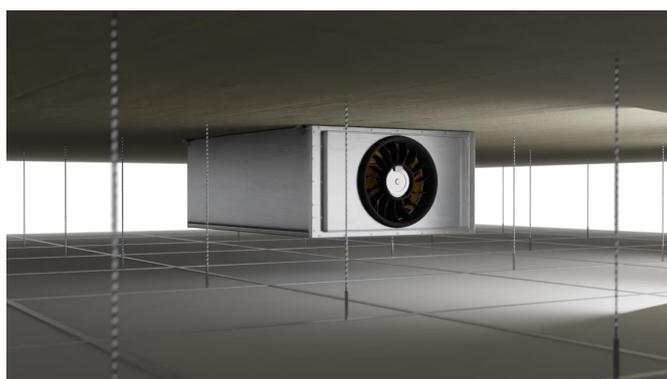
DAC Technologies Study

Firstly, a comprehensive study of available DAC technologies was carried out to determine the most suitable option for integration into building HVAC systems. The two main technologies evaluated, the rest were discarded due to their low level of technological maturity, were solid adsorption (S-DAC) and liquid absorption (L-DAC).

The S-DAC technology with solid adsorbent was chosen because of its higher flexibility and compatibility with existing HVAC systems in buildings due to its high modularity. The L-DAC technology was discarded mainly because of its lower adaptability to urban environments and the need for larger installations, which made it less viable for this specific type of application, in addition to other factors such as its high-water consumption and the high temperature required for the regeneration of the adsorbent.

Design and Development of the S-DAC Module

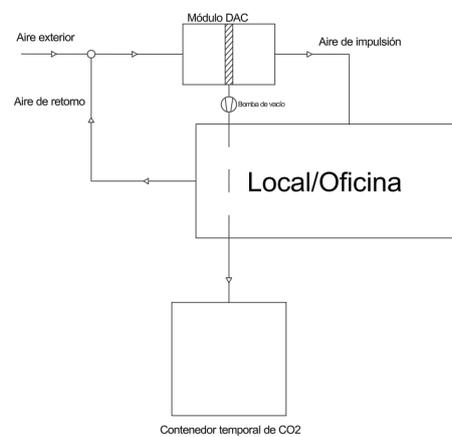
The project has developed a small, highly modular S-DAC module, designed to be integrated into HVAC systems without the need for extensive modifications to the existing infrastructure. The new module, with dimensions of approximately 0.4x0.7x1 m, is considerably smaller than commercially available models, allowing for faster and cheaper installation. This modular design allows for an estimated average installation of 40 modules per building, which significantly increases the total CO₂ capture capacity.



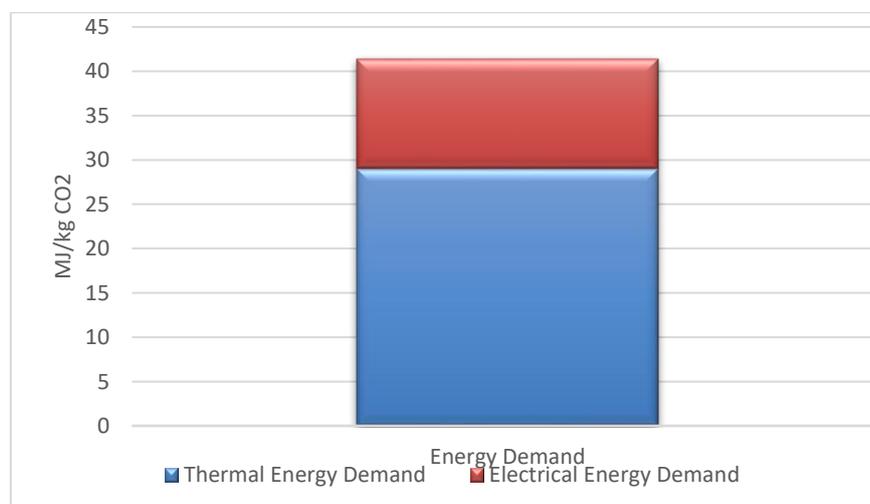
The S-DAC module uses an amine-functionalised adsorbent, which has proven to be highly efficient in CO₂ capture. The module's operating cycle is based on a TVSA (Temperature-Vacuum Swing Adsorption) desorption-regeneration process, which performs 3 cycles per day, achieving a capture capacity of approximately 1 ton of CO₂ per year per module.

Technical Feasibility

The technical analysis of the project shows that the implementation of the S-DAC module is feasible from both a design and operational point of view. The system is connected to the outside air duct and to the return air of the building, which allows capturing CO₂ from an air stream with a higher concentration of CO₂ (800-1000 ppm in the return air versus 400-500 ppm in the outside air). This configuration not only improves capture efficiency, but also optimizes the energy use of the HVAC system, reducing the need for continuous ventilation and therefore energy consumption.

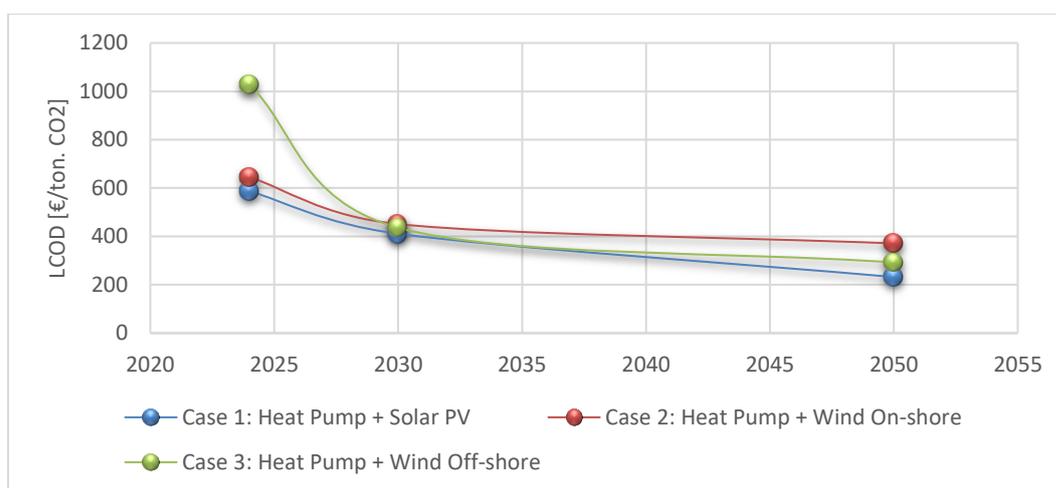


The thermal energy demand (mainly affected by the adsorbent regeneration process, at 100°C) and the electrical energy demand have been calculated separately, obtaining the following values for the 40-module implementation case:



Economic Feasibility

The current study has been carried out in addition to the projection to 2030 and 2050 of the LCOD (Levelized Cost of DAC) for three cases of different energy use: Heat Pump + Solar Photovoltaic, Heat Pump + Wind On-shore and Heat Pump + Wind Off-shore; and the following results have been obtained:



These figures show that, as the technology develops and scales, the cost of CO₂ capture using this system will become increasingly competitive, especially against other emission reduction technologies.

For Case 1, the project has proven to be viable in the long term, with positive financial indicators. The financial analysis shows an NPV of 672.92 € and an IRR of 8.30%, recovering the investment after 14 years. These results indicate that the project is not only profitable, but also attractive for investment, especially considering the possibility of receiving grants from the EU Innovation Fund, which can cover up to 60% of the initial costs.

Regulatory-Environmental Alignment

The project is aligned with the European Taxonomy, meeting sustainability criteria that promote investments in technologies that contribute significantly to climate change mitigation. By capturing CO₂ directly from the air and reducing net GHG emissions, the S-DAC module contributes to the decarbonization targets set by the EU. In addition, the integration of the system into buildings helps to meet the requirements of the EPBD, which calls for energy efficiency improvements and emission reductions in the building sector.

Conclusion

In summary, the project demonstrates the technical, economic and regulatory feasibility of integrating DAC technology into HVAC systems in buildings. The development of a smaller, modular module not only facilitates implementation and reduces installation costs, but also improves CO₂ capture efficiency, effectively contributing to the decarbonization of the real estate portfolio. With a strong alignment with European regulations, the project is positioned as an innovative and sustainable solution to reduce CO₂ emissions in buildings, backed by positive financial indicators and a design that maximizes energy efficiency.

Índice de la memoria

<i>Índice de Figuras</i>	<i>IV</i>
<i>Índice de Tablas</i>	<i>VI</i>
<i>Glosario</i>	<i>VIII</i>
<i>Capítulo 1. Introducción</i>	<i>10</i>
<i>Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías</i>	<i>17</i>
<i>Capítulo 3. Estado de la Cuestión</i>	<i>18</i>
3.1 Tecnología DAC.....	20
3.2 Procesos DAC	22
3.2.1 Procesos Químicos	22
3.2.2 DAC por Membranas	25
3.2.3 DAC por Criogenia	26
3.2.4 DAC por Adsorción por Electrodo.....	28
3.3 Aplicaciones del CO ₂ Capturado.....	30
<i>Capítulo 4. Definición del Trabajo</i>	<i>34</i>
4.1 Justificación.....	34
4.2 Objetivos	35
4.3 Planificación.....	36
<i>Capítulo 5. Análisis y Elección de la Tecnología DAC</i>	<i>37</i>
5.1 Elección de la Tecnología DAC.....	37
5.2 Características y Componentes	42
5.3 Principales Empresas Comercializadoras.....	49
5.3.1 Climeworks.....	49
5.3.2 Global Thermostat.....	49
5.3.3 Carbon Capture.....	50
5.3.4 Soletair Power.....	51

5.4 Comparación Económica con Tecnologías Alternativas en la Descarbonización de Edificios	53
5.5 Posibles Escenarios para su Implementación	55
5.5.1 Escenario I: Edificio Nuevo	55
5.5.2 Escenario II: Retrofit de Edificio	55
Capítulo 6. Estudio de la Viabilidad Técnica	57
6.1 Adsorbente	57
6.2 Proceso de Adsorción-Desorción	59
6.3 Módulo DAC	62
6.4 Demanda Energética del Proceso	71
6.4.1 Demanda Térmica	72
6.4.2 Demanda Eléctrica	77
6.4.3 Demanda Energética Total	78
6.5 Aprovisionamiento Energético	81
Capítulo 7. Estudio de la Viabilidad Económica	83
7.1 Coste Nivelado Actual de la Tecnología	83
7.1.1 LCOE (Levelized Cost Of Electricity)	84
7.1.2 LCOH (Levelized Cost Of Heating)	87
7.1.3 LCOD (Levelized Cost Of DAC)	89
7.2 Horizonte 2030-2050	93
7.3 Análisis Financiero	96
7.3.1 Gastos	96
7.3.2 Ingresos	97
7.3.3 Flujo de Caja	100
7.3.4 Resultados	101
Capítulo 8. Estudio de la Viabilidad Regulatoria - Medioambiental	103
8.1 Taxonomía Europea	103
8.2 Directiva EPBD	112
Capítulo 9. Análisis de Resultados	116
Capítulo 10. Conclusiones y Trabajos Futuros	122

<i>Capítulo 11. Bibliografía.....</i>	<i>124</i>
<i>ANEXO I: Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible.....</i>	<i>132</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Principales inquietudes de la población a medio- largo plazo según el World Economic Forum [1].....	10
Figura 2: Emisiones de GEI en Estados Unidos en 2017 [4]	12
Figura 3: Emisiones históricas globales de CO ₂ por sector [2]	12
Figura 4: Funcionamiento básico del Mercado Europeo de Emisiones [Elaboración propia]	13
Figura 5: Participantes clave en el Mercado Europeo de Emisiones [Elaboración propia]	14
Figura 6: Estimación de la captura global de CO ₂ por BECCUS y DAC en el panorama de neutralidad climática [7]	18
Figura 7: Esquema del proceso DAC genérico [8].....	20
Figura 8: Proceso de Adsorción y Desorción en la tecnología DAC [7].....	23
Figura 9: Proceso ejemplo de Absorción en la tecnología DAC [10]	25
Figura 10: Esquema simplificado del proceso de separación por membranas multietapa [12]	26
Figura 11: Esquema del proceso DAC criogénico [13].....	27
Figura 12: Esquema del proceso DAC de Adsorción por Electrodo [15].....	29
Figura 13: Estimación de la captura global de CO ₂ por DAC, diferenciando entre posterior almacenamiento o uso final, en el panorama de neutralidad climática [7].....	30
Figura 14: Niveles de Maduración Tecnológica (TRLs) establecidos por la NASA [19] ..	38
Figura 15: Esquema básico del proceso TVSA para la regeneración del adsorbente [26]..	47
Figura 16: Estudio del coste de emisiones de CO ₂ evitadas en 4 ciudades americanas [33]	54
Figura 17: Ciclo típico TVSA [36].....	59
Figura 18: Módulo DAC-HVAC de Soletair Power [37].....	62
Figura 19: Comparación de las dimensiones del módulo frente a las dimensiones de las UTAs [Elaboración propia, cotas en mm]	63
Figura 20: Módulo S-DAC a implementar [Elaboración propia, Blender]	64

Figura 21: Esquema genérico de la implementación de la tecnología [Elaboración propia]	65
Figura 22: Módulo instalado en falso techo, vista frontal conducto de impulsión [Elaboración propia, Blender]	66
Figura 23: Módulo instalado en falso techo, vista lateral-izquierda conducto de impulsión [Elaboración propia, Blender]	66
Figura 24: Módulo instalado en falso techo, vista lateral-derecha conducto de impulsión [Elaboración propia, Blender]	67
Figura 25: Módulo instalado en falso techo, vista lateral-izquierda conducto de entrada [Elaboración propia, Blender]	67
Figura 26: Dimensiones del nuevo módulo [Elaboración propia, AutoCAD]	68
Figura 27: Bomba de vacío de Pfeiffer Vacuum [38]	70
Figura 28: Demanda energética general de procesos DAC [7]	71
Figura 29: Demanda térmica de un módulo [Elaboración propia]	76
Figura 30: Demanda energética del proceso [Elaboración propia]	79
Figura 31: LCOD para cada caso [Elaboración propia]	91
Figura 32: Desglose del LCOD para el caso de bomba de calor + solar fotovoltaica [Elaboración propia]	91
Figura 33: Desglose del LCOD para el caso de bomba de calor + eólica on-shore [Elaboración propia]	92
Figura 34: Desglose del LCOD para el caso de bomba de calor + eólica off-shore [Elaboración propia]	92
Figura 35: Evolución del precio del carbono en el EU ETS en el horizonte 2030 [49]	98
Figura 36: Evolución del precio del carbono en el EU ETS en el horizonte 2030-2045 [49]	98
Figura 37: Estudio Financiero [Elaboración Propia]	100
Figura 38: Principales Hitos Temporales de la EPBD [58]	112
Figura 39: Demanda energética total para el caso de estudio [Elaboración propia]	118
Figura 40: LCOD para los tres casos de estudio actualidad-2050 [Elaboración propia]	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: GWP de los principales GEI. [3].....	11
Tabla 2: Reacciones químicas en el proceso de absorción de la tecnología DAC (A puede ser K o Na) [11].....	24
Tabla 3: Ventajas y desafíos de los posibles usos del CO ₂ capturado [Elaboración propia].....	33
Tabla 4: Planificación del proyecto [Elaboración propia].....	36
Tabla 5: Características técnicas clave de las tecnologías S-DAC y L-DAC [7].....	39
Tabla 6: Características principales de los diferentes materiales adsorbente [23], [24].....	45
Tabla 7: Principales Empresas que comercializan la tecnología S-DAC [11].....	52
Tabla 8: Principales características del adsorbente [34], [35].....	58
Tabla 9: Tiempos de las fases del ciclo TVSA [Elaboración Propia].....	61
Tabla 10: Datos para la estimación de la demanda energética de calor [Elaboración propia], [39].....	72
Tabla 11: Desglose de la demanda energética de un módulo [Elaboración propia].....	78
Tabla 12: Desglose de la demanda energética de 40 módulos [Elaboración propia].....	80
Tabla 13: Fuentes para el aprovisionamiento energético [Elaboración propia].....	82
Tabla 14: Vida útil de las diferentes renovables en España [41].....	84
Tabla 15: Factores de amortización de renovables [Elaboración propia].....	85
Tabla 16: Costes de inversión [42].....	85
Tabla 17: Costes de operación y mantenimiento [42].....	85
Tabla 18: Tiempo mínimo de operación a plena potencia de renovables en España [43], [44].....	86
Tabla 19: LCOH del proyecto [Elaboración propia].....	88
Tabla 20: LCOE y LCOH [Elaboración propia].....	89
Tabla 21: Demanda energética [Elaboración propia].....	89
Tabla 22: LCOD para cada caso estudiado [Elaboración propia].....	90
Tabla 23: LCOE recalculado en el horizonte 2030-2050 [Elaboración propia].....	93

Tabla 24: LCOH recalculado en el horizonte 2030-2050 [Elaboración propia]	94
Tabla 25: LCOD recalculado en el horizonte 2030-2050 [Elaboración propia]	95
Tabla 26: Evolución del precio de venta de derechos de emisiones de CO ₂ [Elaboración propia].....	99
Tabla 27: Indicadores de rentabilidad [Elaboración propia]	101
Tabla 28: Alineación con la Taxonomía Europea [Elaboración Propia].....	110
Tabla 29: Calificación energética e índices para edificios de uso distinto al residencial privado [59]	114
Tabla 30: Comparativa frente a un módulo comercial [Elaboración propia]	117

GLOSARIO

CO₂: Dióxido de Carbono

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GWP: Potencial de Calentamiento Global (*Global Warming Potential*)

CCUS: Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono (*Carbon Capture, Utilisation and Storage*)

DAC: Captura Directa del Aire (*Direct Air Capture*)

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

CAI: Calidad de Aire Interior

EPBD: Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios (*Energy Performance Building Directive*)

CDR: Extracción de CO₂ (*Carbon Dioxide Removal*)

TSA: Adsorción por Oscilación de Temperatura (*Temperature Swing Adsorption*)

PSA: Adsorción por Oscilación de Presión (*Pressure Swing Adsorption*)

VSA: Adsorción por Oscilación de Vacío (*Vacuum Swing Adsorption*)

TVSA: Adsorción por Oscilación de Temperatura y Vacío (*Temperature-Vacuum Swing Adsorption*)

LCOD: Coste Nivelado de la tecnología DAC (*Levelized Cost of DAC*)

LCOE: Coste Nivelado de la Electricidad (*Levelized Cost of Electricity*)

LCOH: Coste Nivelado de la Energía Térmica (*Levelized Cost of Heating*)

ZEB: Edificios de Cero Emisiones (*Zero-Emission Buildings*)

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el cambio climático representa uno de los desafíos más significativos para la sociedad a nivel mundial y se ha convertido en una de las principales inquietudes de la población, especialmente a largo plazo (Figura 1).



Figura 1: Principales inquietudes de la población a medio- largo plazo según el World Economic Forum [1]

Se ha comprobado que el aumento de la temperatura global observado en los últimos años se debe principalmente a la actividad humana, especialmente a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), siendo las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) la mayoría (Figura 2). Los combustibles fósiles, incluyendo el carbón, el petróleo y el gas, destacan como los principales impulsores del cambio climático a nivel global, representando más del 75 % de las emisiones mundiales de GEI y casi el 90 % de todas las emisiones de CO₂ [2].

Para comprender la importancia de las emisiones de CO₂, resulta conveniente mencionar el Potencial de Calentamiento Global (GWP por sus siglas en inglés: Global Warming Potential). El índice GWP fue desarrollado para permitir comparaciones de los impactos del calentamiento global de diferentes gases. Acorde al Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés: Intergovernmental Panel on Climate Change), es una medida de cuánta energía absorberán las emisiones de 1 tonelada

de un gas durante un período de tiempo determinado, en relación con las emisiones de 1 tonelada de CO₂ (GWP = 1). Es decir, cuanto mayor sea el GWP, más calienta la Tierra un gas dado en comparación con el CO₂ durante ese período de tiempo (100 años por lo general). La Tabla 1 muestra los valores del índice GWP de los principales GEI y se observa que, aunque sea el más abundante en las emisiones (Figura 2), no es el más dañino en términos de calentamiento global.

GEI	Fórmula Química	Vida media [años]	GWP
Dióxido de Carbono	CO ₂	[-]	1
Metano	CH ₄	12	28
Óxido Nitroso	N ₂ O	114	265
Gases Fluorados	Incluyendo los controlados por el Protocolo de Montreal (1987), HFCs, PFCs, HFEs...		Entre 100 y 23 000

Tabla 1: GWP de los principales GEI. [3]

[-]: La eliminación de CO₂ de la atmósfera implica una serie de procesos diversos y su tasa no puede ser representada por un único valor de tiempo medio (IPCC, 2004)

Desde 1990, se identifican tres sectores como las principales fuentes de GEI con un crecimiento notablemente rápido: los procesos industriales, el transporte y la industria manufacturera y de construcción; siendo los dos últimos subsectores energéticos (Figura 3).

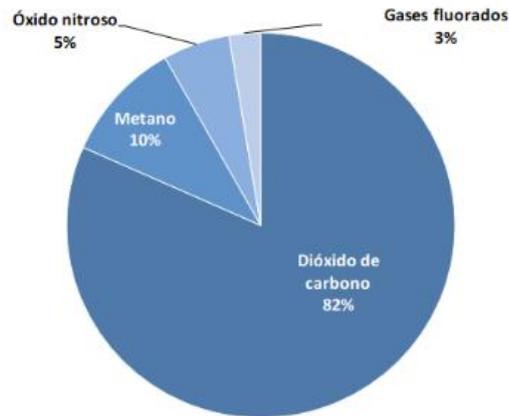


Figura 2: Emisiones de GEI en Estados Unidos en 2017 [4]

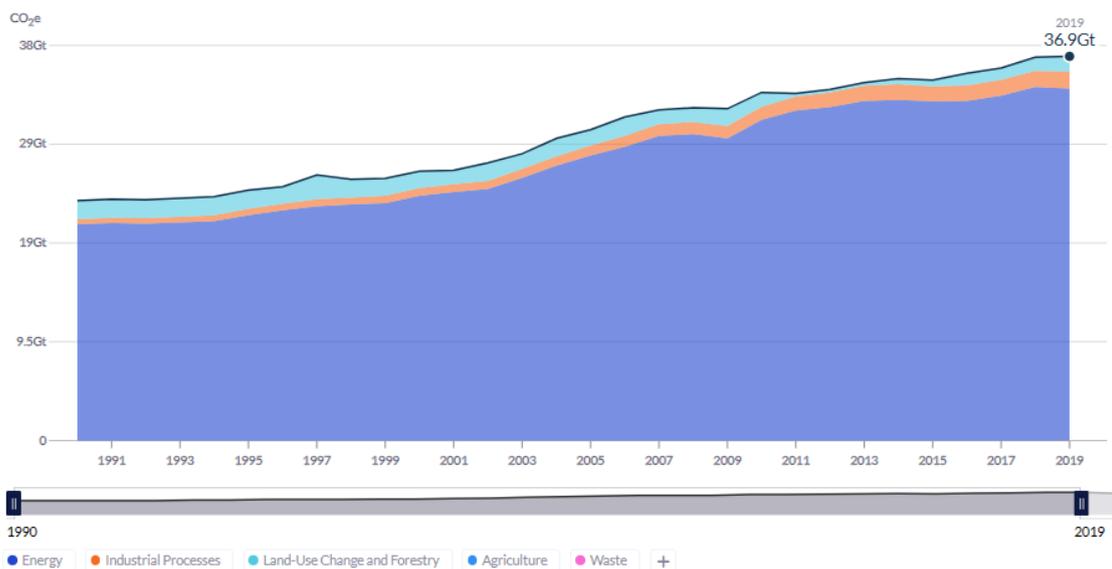


Figura 3: Emisiones históricas globales de CO₂ por sector [2]

Bajo este pretexto, comenzaron a surgir acuerdos entre países para abordar esta situación. El Protocolo de Kioto (1997) estableció compromisos vinculantes para reducir las emisiones de GEI de los países desarrollados. En 2005, con el propósito de promover el uso de tecnologías con menores emisiones de CO₂, la Unión Europea (UE) implementó un mercado

de carbono. Este mercado tiene como objetivo penalizar a las instalaciones más contaminantes mediante la imposición de derechos de emisión, incentivándolas así a invertir en soluciones energéticas más limpias. En caso de que una instalación industrial exceda las toneladas de CO₂ asignadas en los derechos de emisión, se enfrentará a severas sanciones por parte de la UE, aunque tendrá la opción de comprar más derechos de emisiones el mercado secundario. La Figura 4 y Figura 5 reflejan el funcionamiento de este mercado europeo de emisiones, así como los participantes claves en el mismo. Más adelante, el Acuerdo de París (2015) fijó metas climáticas a largo plazo que sirviesen como orientación para todos los países. La meta más significativa fue limitar el aumento de la temperatura global en este siglo a 2°C y esforzarse para limitar este aumento a incluso más de tan solo el 1,5°C. Sin embargo, tal y como se observa en la Figura 3 las emisiones de CO₂ siguen en aumento desde 1990 por lo que las medidas adoptadas en estos acuerdos no parecen haber rendido como se esperaba.

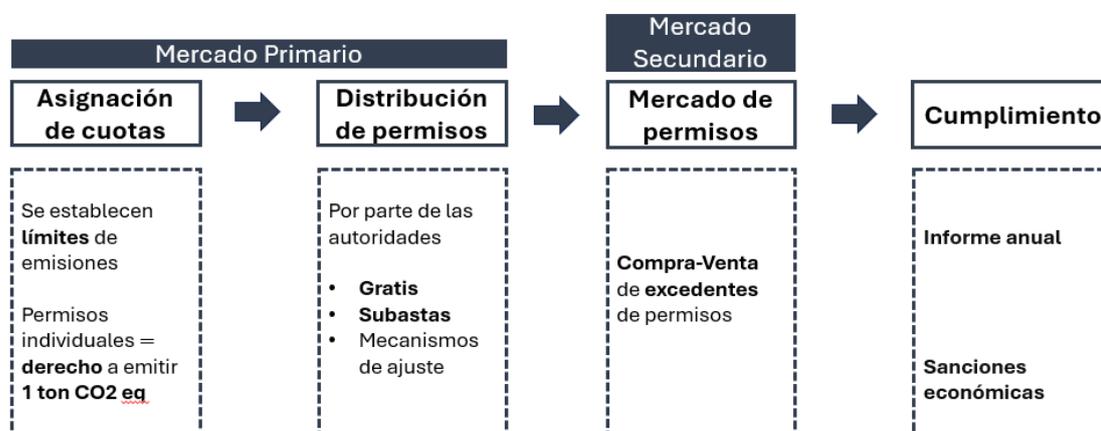


Figura 4: Funcionamiento básico del Mercado Europeo de Emisiones [Elaboración propia]

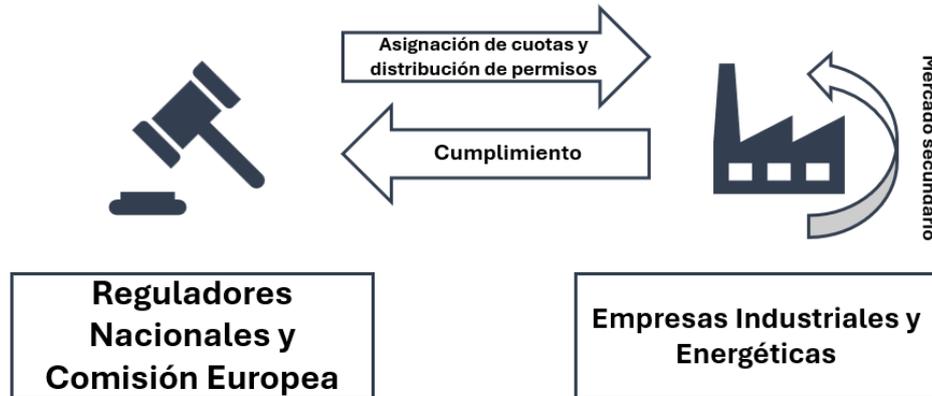


Figura 5: Participantes clave en el Mercado Europeo de Emisiones [Elaboración propia]

En el contexto de este paradigma alarmante marcado por la urgencia climática y la necesidad de acciones concretas, nace el Pacto Verde Europeo (2019). En él, la UE se ha propuesto el desafío ambicioso de lograr la neutralidad climática en el horizonte de 2050 mediante un enfoque que integra aspectos clave como el clima, el medio ambiente, la energía, el transporte, la industria, la agricultura y las finanzas sostenibles [5]. En este contexto, el paquete legislativo "Objetivo 55" ("Fit for 55") surge como un mecanismo para transformar las iniciativas políticas del Pacto Verde Europeo en obligación jurídica, instaurando nuevas iniciativas legislativas para alinear la legislación de la UE con las metas climáticas establecidas [6]. Concretamente, la meta que se busca lograr en este paquete es la de alcanzar una reducción de emisiones de gases de GEI del 55% con respecto a 1990 en el horizonte 2030.

En línea con los objetivos e hitos establecidos por la UE para 2030 y 2050 y, consecuente a la preocupante y creciente presencia de emisiones CO₂ a la atmósfera, surge la importancia de desarrollar tecnologías como la Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono (CCUS por sus siglas en inglés: Carbon Capture, Utilisation and Storage), que se ha destacado como una estrategia prometedora para mitigar el calentamiento global al eliminar CO₂ de la atmósfera. Sin embargo, los métodos actuales de captura de carbono suelen ser costosos, energéticamente intensivos y requieren infraestructuras específicas.

En este contexto, la tecnología de Captura Directa del Aire (DAC por sus siglas en inglés: Direct Air Capture), a diferencia de los métodos convencionales que capturan CO₂ en fuentes estacionarias como plantas industriales, permite extraer CO₂ directamente del aire ambiente, independientemente de su concentración. Este enfoque ofrece una mayor flexibilidad y escalabilidad, lo que lo convierte en una herramienta prometedora para abordar las emisiones de CO₂ de origen no estacionario, como las asociadas con el transporte y la calefacción de edificios, entre otras.

La implementación e investigación de este tipo de tecnologías se pueden ver favorecidas mediante vías regulatorias y/o vías económicas. En el marco regulatorio, la UE dispone de su Taxonomía, que establece un marco claro para identificar las actividades económicas sostenibles e incluye una orientación sobre las inversiones en tecnologías de bajas emisiones; y de la Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios (EPBD por sus siglas en inglés: Energy Performance Building Directive) que fomenta la adopción de soluciones energéticamente eficientes en edificios estableciendo una serie de hitos temporales para los edificios en materia de eficiencia energética.

En lo respectivo al marco de ayudas económicas, la financiación para proyectos de este tipo generalmente proviene de incentivos fiscales, subsidios e inversiones del sector privado. Los incentivos fiscales ofrecen beneficios tributarios a las empresas que implementan medidas de reducción de carbono, por lo que se puede beneficiar de deducciones o créditos fiscales. Por otro lado, los subsidios gubernamentales proporcionan fondos adicionales para proyectos específicos de mitigación del cambio climático. Por último, el sector privado, a través de inversiones directas o mediante la compra de bonos de carbono y otros instrumentos financieros relacionados con el clima, tiene un papel fundamental en la financiación de esta clase de proyectos.

Por otro lado, la calidad del aire interior (CAI) se ha convertido en un tema de creciente preocupación tanto para los edificios como para la salud y el bienestar de las personas que los ocupan. La presencia de contaminantes como compuestos orgánicos volátiles (COV), material particulado grueso (PM₁₀), fino (PM_{2,5}) y ultrafino (PM_{0,5}), polvo, alérgenos y

microorganismos puede conllevar consecuencias adversas en la salud respiratoria, la productividad en el trabajo y el confort de los ocupantes de los edificios. Por ello, garantizar una CAI óptima resulta cada vez más importante para los edificios y los ocupantes de estos.

En este contexto, Aire Limpio es una de las compañías más influyentes en materia de CAI. Concretamente, promueven iniciativas y tecnologías de HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) novedosas dirigidas a empresas de diferentes ámbitos, tales como hospitales, oficinas, escuelas o instalaciones gubernamentales, con el fin de mejorar la CAI. Estas acciones generan impactos positivos en la salud, la sostenibilidad, la eficiencia energética y el rendimiento laboral.

Bajo este pretexto, surge la idea evaluar la posibilidad de integrar la tecnología DAC en los sistemas HVAC.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

Se utilizará la herramienta **Microsoft Excel** para la realización de los cálculos de viabilidad técnica y económica necesarios, como, por ejemplo, para el cálculo de la rentabilidad de la tecnología.

Por otro lado, se hará uso de la herramienta **AutoCAD** a la hora de realizar diagramas explicativos, así como planos detallados del módulo.

Además, se utilizará la herramienta de diseño gráfico **Blender** para las imágenes del dispositivo y sus ejemplos de instalación.

Por último, en el apartado de viabilidad económica, para estimar el coste de la tecnología se realizará su cálculo siguiendo el **modelo de coste nivelado de una tecnología** (LCOD en este caso, por sus siglas en inglés *Levelized Cost Of DAC*).

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Como se ha mencionado previamente, los objetivos de neutralidad climática de la UE requieren de tecnologías de extracción de CO₂ (CDR, por sus siglas en inglés: Carbon Dioxide Removal). Actualmente, hay diversas tecnologías y métodos disponibles para respaldar la CDR, incluyendo opciones naturales como la reforestación, mejoras en procesos naturales como el carbón vegetal y enfoques tecnológicos que cuentan con el apoyo de tecnologías de CCUS [7].

Entre estos enfoques tecnológicos, surgen las tecnologías DAC y bioenergía con CCUS (BECCUS por sus siglas en inglés: Bio Energy with Carbon Capture Utilisation and Storage), con el objetivo de conducir el sistema energético global hacia un escenario cero emisiones netas para el año 2050. En el horizonte 2030, la contribución de estas tecnologías es limitada. Sin embargo, se estima que ambas tecnologías lleven a cabo una evolución continua y un despliegue considerable y ambicioso en el horizonte 2050 (Figura 6).

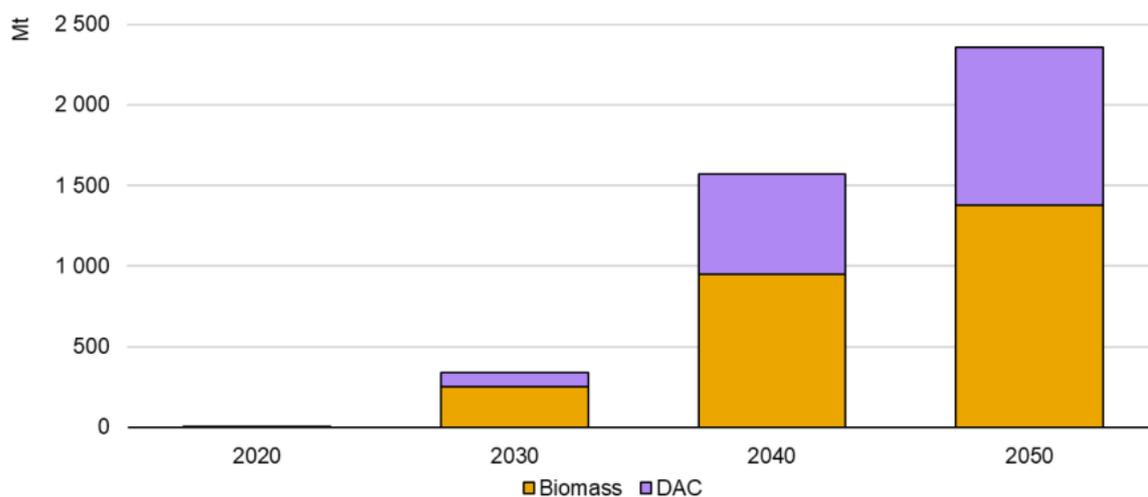


Figura 6: Estimación de la captura global de CO₂ por BECCUS y DAC en el panorama de neutralidad climática [7]

Concretamente, a lo largo de este capítulo, se analizarán los procesos actuales de tecnología DAC, así como los procesos emergentes de la misma tecnología. Por último, se explicarán los posibles usos finales para el CO₂.

3.1 *TECNOLOGÍA DAC*

La captura directa de aire es una tecnología que elimina el CO₂ del aire ambiente a través de procesos químicos o físicos. Tras la captura, este CO₂ puede ser almacenado bajo tierra, utilizado para la recuperación mejorada de petróleo, o usado para fabricar productos químicos, combustibles y/o cemento. La principal diferencia frente a la tecnología CCUS es que, como se ha mencionado previamente, la captura se realiza en el aire ambiente en vez de en fuentes puntuales. La Figura 7 refleja esquemáticamente el proceso simplificado de esta tecnología.

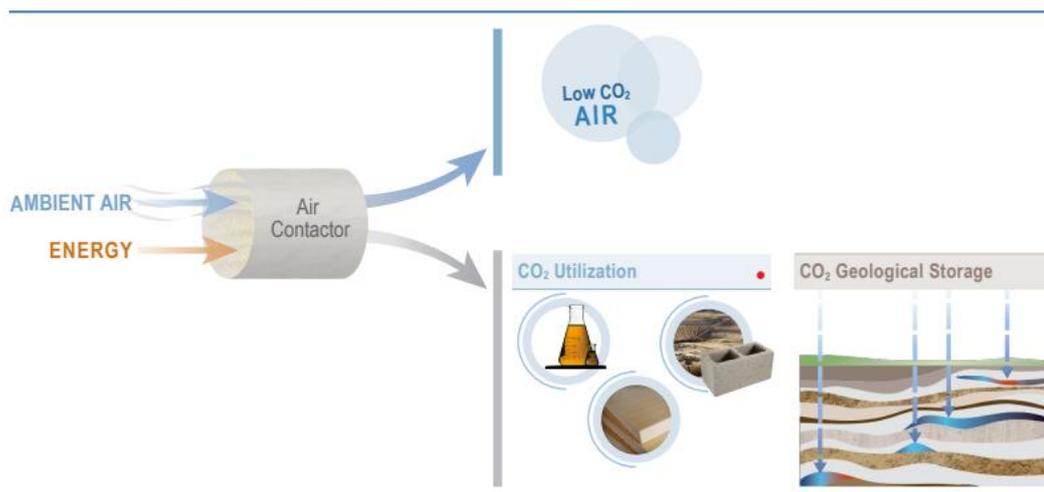


Figura 7: Esquema del proceso DAC genérico [8]

La tecnología DAC sobresale frente a otros métodos de CDR por su eficiencia y el nivel de control que puede ofrecer. La DAC destaca por su potencial de ampliación, la certeza en la captura de CO₂ y la durabilidad del almacenamiento. A modo de comparación, la eficacia de la DAC en el aprovechamiento del terreno supera en más de cien veces a la que se logra con la reforestación, haciéndola una alternativa más viable para implementar a gran escala. [9].

Actualmente, existen 19 plantas DAC en funcionamiento en todo el mundo que capturan alrededor de 10 000 toneladas de CO₂ (0,01 Mt) al año [10]. Además, se ha estimado que,

para 2030, la capacidad de captura a nivel mundial supere las 85 Mt de CO₂ y alcance las 980 Mt en el 2050 [7].

Sin embargo, la DAC podría no cumplir con sus expectativas debido a su elevado coste inicial y al apoyo insuficiente de entidades gubernamentales y de la industria para la reducción de dichos costes. Para una adopción extensa de la tecnología, los costes asociados con la DAC necesitan reducirse significativamente. Acorde a un estudio del Boston Consulting Group (BCG), el coste actual (incluyendo el posterior almacenamiento), que oscila entre los 600\$ y 1 000\$ por tonelada de CO₂, se deberá reducir hasta llegar a un costo por debajo de los 200\$ y, a ser posible, aproximarse a 100\$ por tonelada antes del año 2050 [9].

3.2 PROCESOS DAC

Los procesos químicos principales que se utilizan hoy en día para capturar el CO₂ del aire ambiente se explican a continuación.

3.2.1 PROCESOS QUÍMICOS

3.2.1.1 DAC por Adsorción-Desorción

Este proceso es el que lleva a cabo la tecnología que se conoce como DAC sólida.

En la adsorción, los materiales adsorbentes, como zeolitas, por ejemplo, son los que capturan el CO₂ del aire. Estos materiales poseen superficies porosas que ofrecen una alta área específica para la adsorción de CO₂. La efectividad de la captura depende significativamente de las propiedades del adsorbente, como puede ser la capacidad de adsorción, y la facilidad de regeneración (al tratarse de un proceso cíclico). La adsorción tiene lugar a temperatura y presión ambiente.

La regeneración del adsorbente y la colecta del CO₂ capturado se lleva a cabo mediante la desorción (proceso inverso). Este proceso se puede lograr mediante cambios térmicos, aplicando calor al adsorbente (idealmente a través de energía térmica proveniente de renovables); reducción de presión, o una combinación de ambos, como es el caso del proceso de oscilación de temperatura y vacío (liberación a baja presión y temperatura media, 80-100 °C). De esta forma se permite la liberación del CO₂, en estado gaseoso, para su almacenamiento o uso y la reutilización del adsorbente en múltiples ciclos.

Un dispositivo DAC con este proceso puede llegar a alcanzar una capacidad de captura de alrededor de 50 toneladas de CO₂ al año [7].

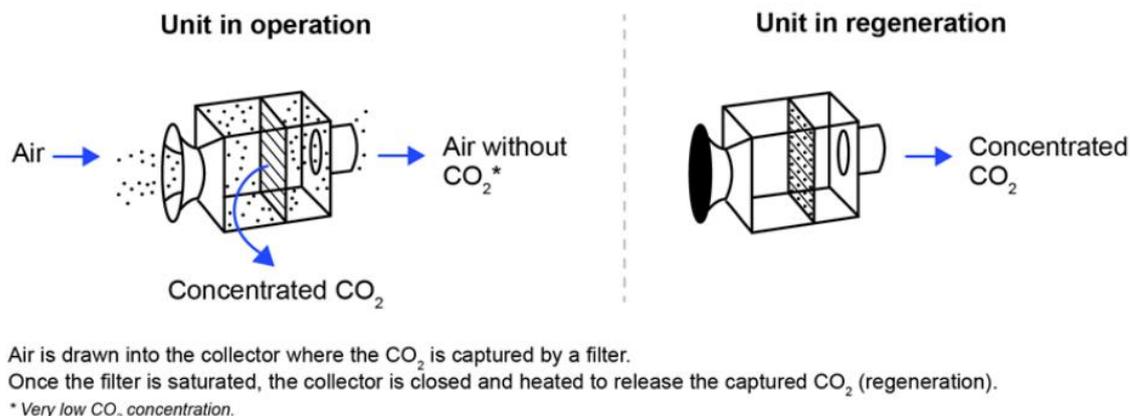


Figura 8: Proceso de Adsorción y Desorción en la tecnología DAC [7]

3.2.1.2 DAC por Absorción

Este proceso es el que lleva a cabo la tecnología que se conoce como DAC líquida e implica dos circuitos químicos cerrados que trabajan en conjunto para capturar CO₂ de la atmósfera y liberarlo en una forma concentrada (Figura 9: Proceso ejemplo de Absorción en la tecnología DAC [10]Figura 9).

Durante la fase inicial, conocida como fase de absorción, el aire del entorno se pone en contacto con una solución acuosa básica, generalmente de hidróxido de potasio (KOH), hidróxido de sodio (NaOH), o hidróxido de calcio (Ca(OH)₂). En esta etapa, el CO₂ presente en el aire reacciona con el hidróxido formando carbonato de potasio (K₂CO₃), de sodio (Na₂CO₃) o de calcio (CaCO₃). Este proceso de captura química del CO₂ se lleva a cabo a presión ambiente y a la temperatura del entorno, lo que ayuda a reducir el gasto energético asociado a esta fase [11].

Posteriormente, la solución resultante carbonatada se lleva al segundo ciclo, llamado ciclo de regeneración. Aquí, la solución se combina con hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) dentro de un reactor de lecho fluidizado dando lugar a carbonato de calcio (CaCO₃) y se recupera el KOH o NaOH para ser reutilizado en la fase de absorción. En el caso de utilizar como

solvente líquido $\text{Ca}(\text{OH})_2$, la fase que tiene lugar en el reactor de lecho fluidizado no sería necesaria [11].

El CaCO_3 obtenido es redirigido a la fase de calcinación, donde es sometido a un calentamiento hasta alcanzar aproximadamente entre 300-900 °C. Este proceso resulta en la liberación de CO_2 y la conversión del CaCO_3 en óxido de calcio (CaO). Finalmente, el CaO es procesado en un *slaker* para ser hidratado, generando de nuevo $\text{Ca}(\text{OH})_2$ listo para ser utilizado en el ciclo de regeneración. La Tabla 3 muestra un resumen de las reacciones que tienen lugar en cada fase del proceso según el tipo de solución acuosa utilizado [11].

Alkaline Type	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	AOH
Air Contactor	$\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{aq}) + \text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CaCO}_3(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$ (1)	$2\text{AOH}(\text{aq}) + \text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow \text{A}_2\text{CO}_3(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{aq})$ (2)
Causticizer	-	$\text{A}_2\text{CO}_3(\text{aq}) + \text{Ca}(\text{OH})_2(\text{aq}) \rightarrow 2\text{AOH}(\text{aq}) + \text{CaCO}_3(\text{s})$ (3)
Calcliner	$\text{CaCO}_3(\text{s}) + \text{Heat} \rightarrow \text{CaO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$ (4)	$\text{CaCO}_3(\text{s}) + \text{Heat} \rightarrow \text{CaO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$ (5)
Slaker	$\text{CaO}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2(\text{aq})$ (6)	$\text{CaO}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2(\text{aq})$ (7)

Tabla 2: Reacciones químicas en el proceso de absorción de la tecnología DAC (A puede ser K o Na) [11]

Una planta de DAC a gran escala con absorción puede llegar a alcanzar una capacidad de captura de 1 millón de toneladas de CO_2 al año.

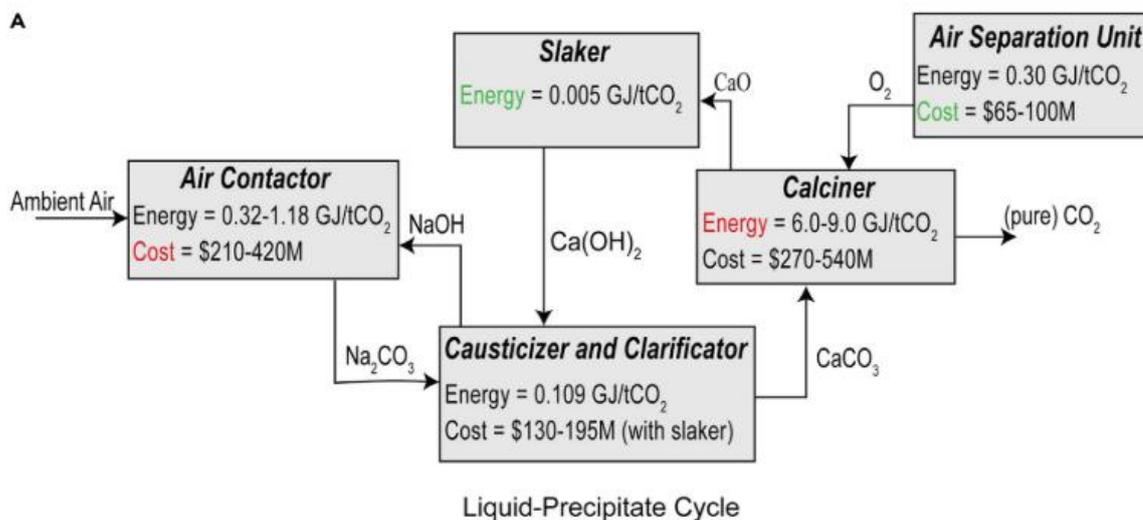


Figura 9: Proceso ejemplo de Absorción en la tecnología DAC [10]

3.2.2 DAC POR MEMBRANAS

La tecnología DAC mediante el uso de membranas (m-DAC) se basa en la utilización de membranas de polímeros orgánicos que actúan como barreras semipermeables para separar el CO₂ del aire. Este enfoque es considerado una nueva tecnología potencial debido a los avances en la permeabilidad del CO₂ a través de membranas de separación de gases. A diferencia de las tecnologías anteriores, que requieren mucha energía para actuar, las membranas ofrecen un método potencialmente más eficiente y con menor huella energética.

El m-DAC implica el uso de simulaciones de procesos químicos para evaluar la viabilidad de utilizar estas membranas en la captura de CO₂ del aire. Generalmente, los métodos que utilizan membranas enfrentan desafíos técnicos debido a las concentraciones reducidas de CO₂ en el aire y presentan una selectividad limitada hacia el CO₂ a presión atmosférica. Esto hace necesario comprimir grandes volúmenes de aire ambiente de forma costosa para lograr una separación eficaz del CO₂.

Entre varias investigaciones, se ha llevado a cabo una en la que han simulado un proceso de separación multietapa para determinar los requisitos energéticos y el rendimiento de las membranas en la captura de CO₂ [12]. Este enfoque utiliza membranas que tienen altas

permeabilidades y selectividades hacia el CO₂, lo que podría permitir su captura efectiva incluso a las bajas presiones parciales de CO₂ presentes en la atmósfera.

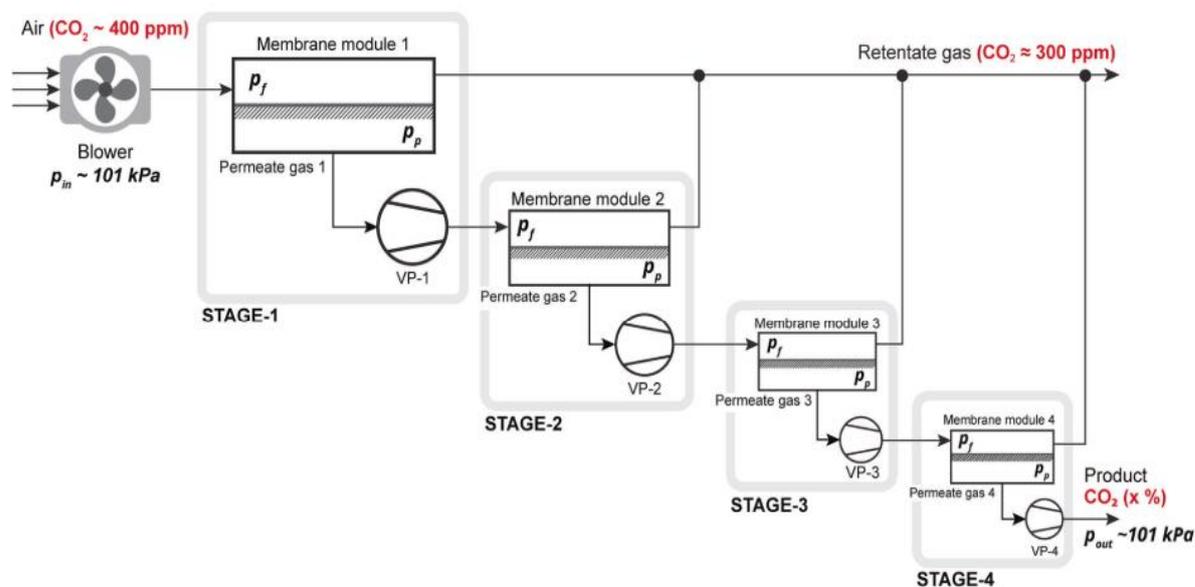


Figura 10: Esquema simplificado del proceso de separación por membranas multietapa [12]

El análisis de simulación de este proceso muestra que, para ser energéticamente competitivo, el m-DAC requiere membranas con una permeabilidad muy alta y una buena selectividad hacia el CO₂ [12].

Además, se ha llegado a argumentar que una mayor permeancia de gas, que hace referencia a la relación entre la capacidad de la membrana para permitir el paso del gas y su espesor, podría tener un impacto más significativo que la selectividad hacia el CO₂ con el objetivo de reducir el alto costo de este proceso [7].

3.2.3 DAC POR CRIOGENIA

La criogenia es un proceso de enfriamiento del aire hasta temperaturas extremadamente bajas para una sublimación o condensación del CO₂ y pueda ser separado en forma líquida o sólida.

El proceso de captura criogénica se centra en el uso de las propiedades físicas del CO_2 , que tiene un punto de sublimación más alto comparado con otros gases presentes en la atmósfera, excepto el vapor de agua. Esto permite una solidificación del CO_2 bajo condiciones controladas de baja temperatura y alta presión, sin afectar significativamente a los demás componentes del aire.

El proceso completo de la criogenia para capturar CO_2 está representado esquemáticamente en la Figura 11.

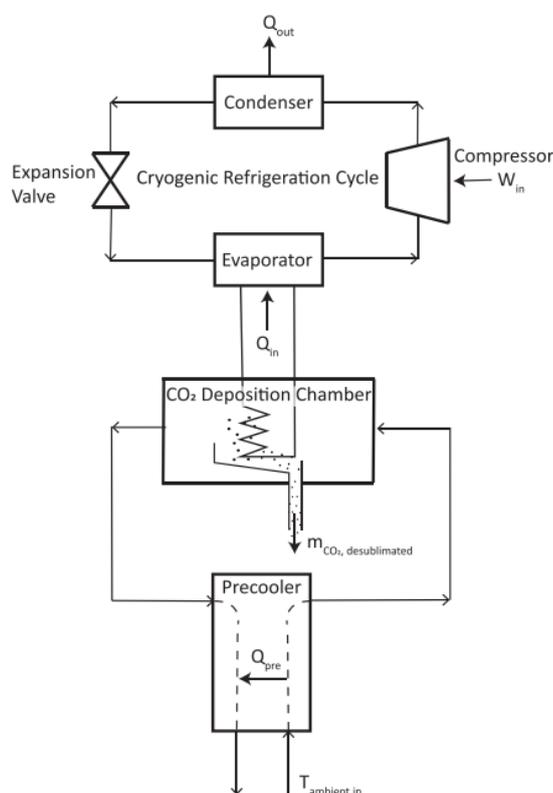


Figura 11: Esquema del proceso DAC criogénico [13]

El consumo energético estimado para la sublimación del CO_2 en entornos con climas fríos es de aproximadamente 30 GJ por cada tonelada de CO_2 [13], considerablemente más alto que los métodos basados en procesos químicos mencionados anteriormente estimados entre 1,2 y 1,7 GJ por tonelada de CO_2 [14].

Esta diferencia de consumo de energía está principalmente originada por las condiciones óptimas para la captura que requiere este proceso. Se ha estimado que el proceso puede requerir de temperaturas extremadamente frías, pudiendo llegar a los $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ [13], para que la captura de CO_2 sea eficiente, suponiendo que el entorno climático es frío (regiones polares).

Este enfoque tecnológico para la captura de CO_2 es prometedor, especialmente si se implanta en lugares como el norte de Canadá, Siberia o la Antártida [13], donde las temperaturas extremadamente bajas, las zonas escasamente pobladas y los patrones de viento fuertes y constantes ofrecen condiciones ventajosas para compensar los costes energéticos asociados al proceso. Por lo tanto, aprovechando estas ventajas, puede mejorarse la viabilidad del DAC criogénico como solución escalable y económicamente viable para reducir los niveles de CO_2 en el aire.

3.2.4 DAC POR ADSORCIÓN POR ELECTRODOS

La adsorción por electrodos o adsorción electroquímica es una tecnología emergente en el ámbito de la DAC. El proceso, representado en la Figura 12, se basa en la utilización de células electroquímicas que contienen un electrodo negativo recubiertos de nanocompuestos de poli antraquinona, que captura CO_2 al cargarse a través de la carboxilación de las quinonas reducidas y, después de que se invierta la polaridad, libera CO_2 al descargarse [15].

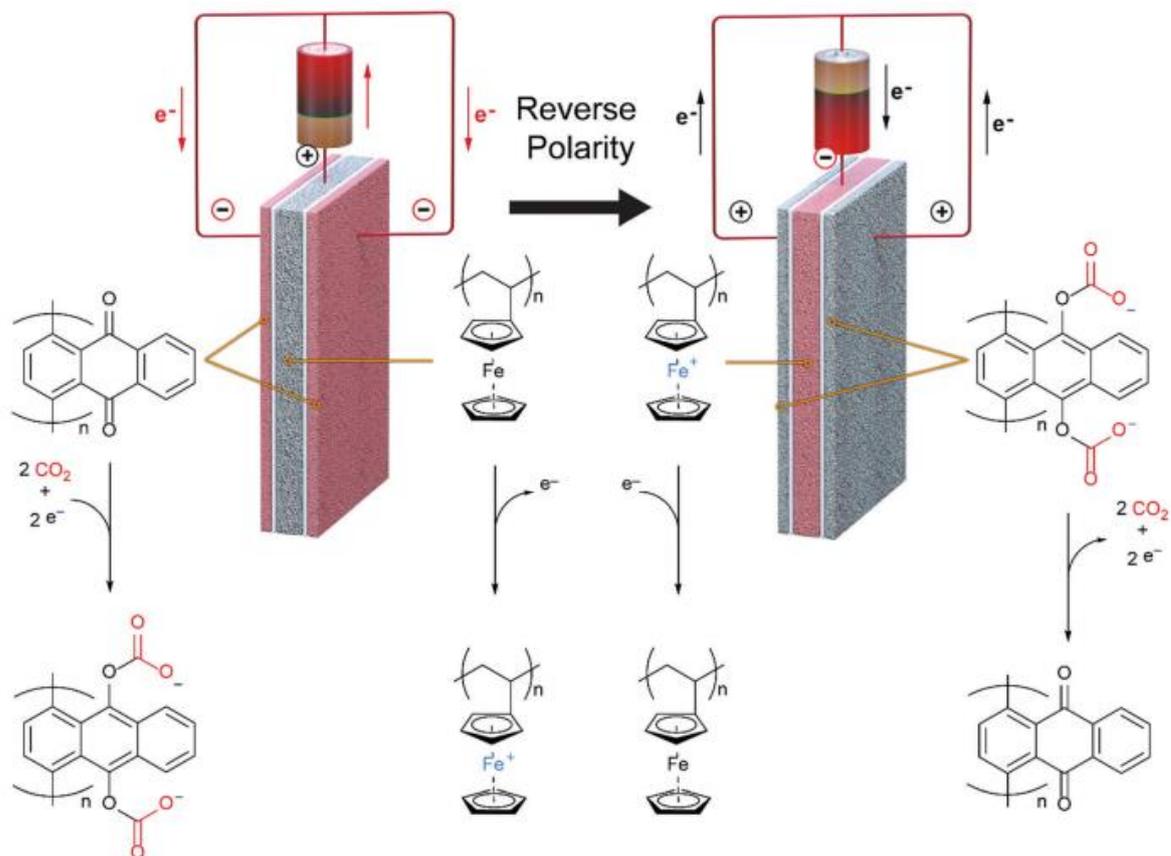


Figura 12: Esquema del proceso DAC de Adsorción por Electroodos [15]

Aunque se trata de una tecnología en desarrollo, la adsorción por electrodos ha demostrado una alta eficiencia y durabilidad, así como una capacidad de captura constante. Además, se ha estimado un coste de la tecnología entre los 50\$ y 100\$, dependiendo de la concentración y aplicación en consideración. Por lo tanto, a priori, parece ser económicamente viable.

3.3 APLICACIONES DEL CO₂ CAPTURADO

Actualmente, existen dos posibilidades para el CO₂ capturado por esta tecnología: almacenarlo o encontrarle otro uso, directo (como refrigerante, por ejemplo) o indirecto (como parte de un proceso, por ejemplo, en la producción de materiales de construcción). La Agencia Internacional de la Energía (IEA) estima que del total de CO₂ capturado por DAC en el horizonte 2050 (980 Mt), alrededor del 36% (350 Mt) será destinado a un uso final, concretamente en combinación con el hidrógeno para la producción de combustibles sintéticos. Se estima que el porcentaje de uso final del CO₂ capturado frente a su almacenamiento irá creciendo desde la actualidad de forma creciente como se especifica en la Figura 13.

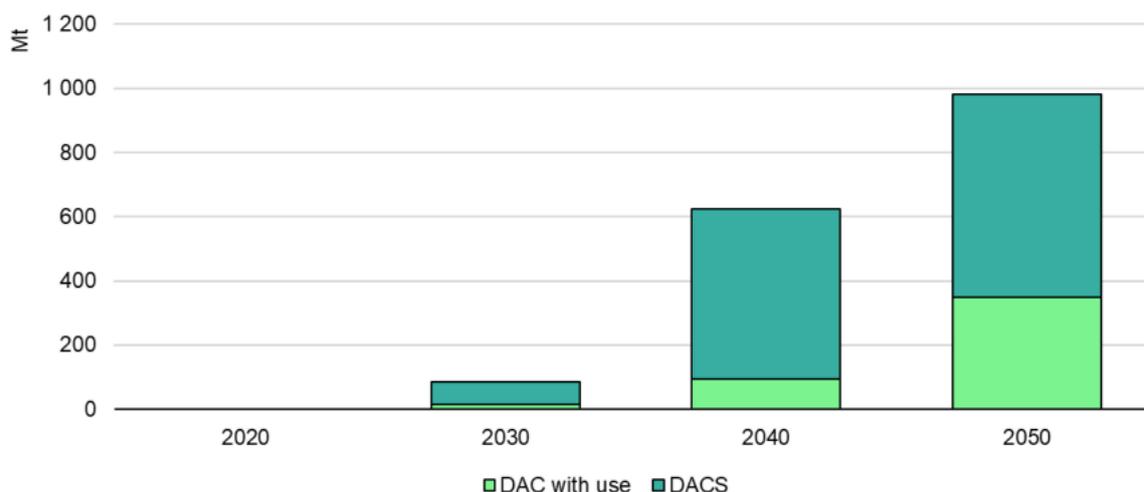


Figura 13: Estimación de la captura global de CO₂ por DAC, diferenciando entre posterior almacenamiento o uso final, en el panorama de neutralidad climática [7]

En lo referente al almacenamiento permanente, también llamado secuestro de carbono, el CO₂ se puede almacenar geológicamente en yacimientos agotados de gas y petróleo, en formaciones rocosas, como el basalto y las peridotitas, donde se mineraliza; y en acuíferos salinos profundos, que disponen de una mayor capacidad de almacenamiento [7].

Por otro lado, el CO₂ capturado por DAC puede ser utilizado en el proceso de producción del hormigón, reduciendo las emisiones globales que lleva consigo este material, estimadas

en un 8% con respecto a las emisiones totales de CO₂ [16]. Al inyectar CO₂ en el hormigón fresco, se produce una reacción química (carbonatación mineral) que incrusta el CO₂ de forma permanente dentro del hormigón. Además, se ha demostrado que esta tecnología mejora las propiedades mecánicas, siendo la resistencia y durabilidad las más destacables, del hormigón [17].

Otra aplicación prometedora es la utilización del CO₂ capturado en la producción de combustibles sintéticos, mediante la reacción con hidrógeno de origen renovable. Además, este tipo de combustibles pueden ser diseñados para ser compatibles con la infraestructura existente y ofrecen no solo una reducción muy notable de emisiones sino también unas propiedades muy similares en comparación con los combustibles clásicos derivados del petróleo.

Además, el CO₂ capturado también se puede aprovechar en procesos innovadores para la producción de hidrógeno, especialmente en reacciones como el reformado de metano con CO₂. Este proceso implica la reacción del metano (CH₄) con el CO₂ capturado para producir hidrógeno (H₂) y monóxido de carbono (CO) [18]. Aunque el CO₂ no se utiliza directamente en la electrólisis tradicional del agua para producir hidrógeno verde, el hidrógeno generado a través del reformado seco puede considerarse azul dependiendo del manejo del CO₂ originado durante el proceso.

Por último, en el caso concreto que abarca este proyecto de integrar la DAC en sistemas HVAC de edificios, el CO₂ capturado se podría llegar a implementar en el sistema de refrigeración del edificio. Utilizar el CO₂ capturado como refrigerante, comúnmente conocido como R-744, resulta una alternativa interesante al tratarse de un refrigerante natural que no es tóxico ni inflamable. Al igual que los refrigerantes más utilizados actualmente, los HFCs, tienen un potencial destructor de la capa de ozono (ODP por sus siglas en inglés: *Ozone Depletion Potential*) nulo, por lo que cumplen con lo establecido en el Pacto de Montreal al no estar compuesto de cloro. Además, el restrictivo calendario de supresión de ciertos refrigerantes establecido por la UE en su reglamento FGas debido al elevado GWP de los HFCs, hace de este uso del CO₂ una alternativa necesaria debido a su bajo GWP en

comparación con los refrigerantes tradicionales. Se recuerda que el CO₂ tiene un GWP = 1, en contraste al GWP superior a 100 de los HFCs (Tabla 1).

A continuación, la Tabla 3 muestra un breve resumen de las ventajas y desafíos que conllevan los posibles usos del CO₂ capturado explicados anteriormente.

	Ventajas	Desafíos
Almacenamiento geológico	Utilización de infraestructura ya existente	Elevados costes de transporte e inyección
	Almacenamiento permanente	Oposición por parte de la población (efecto <i>Not in my backyard</i>)
Producción de hormigón	Incrustación permanente en el hormigón	Integrar esta tecnología en el proceso de producción existente
	Mejora de las propiedades mecánicas del hormigón	
Producción de combustibles sintéticos	Compatibilidad con la infraestructura de combustibles actuales	Requerimiento de energía renovable para ser sostenible
		Proceso en vías de desarrollo
Producción de hidrógeno	Se reducen las emisiones del proceso de producción al incluir el CO ₂ en el mismo	Dependencia de un hidrocarburo fósil (metano)
Refrigerante	Muy bajo GWP en comparación con los HFCs	Necesidad de altas presiones operativas puede aumentar los costes de implementación
	Alineado con el reglamento FGas de la UE	Adaptación a la infraestructura existente en el edificio

Tabla 3: Ventajas y desafíos de los posibles usos del CO₂ capturado [Elaboración propia]

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 JUSTIFICACIÓN

Desde el punto de vista técnico, la integración de la tecnología DAC en sistemas HVAC presenta una doble ventaja significativa. En primer lugar, mejora la calidad del aire interior al extraer contaminantes y CO₂, contribuyendo así a un ambiente más saludable en interiores y cumpliendo con normativas cada vez más estrictas sobre calidad del aire interior en espacios cerrados. En segundo lugar, esta tecnología captura CO₂ del aire exterior, lo que permite una reducción de la concentración de este gas en la atmósfera, combatiendo de manera efectiva el cambio climático.

Económicamente, este proyecto se centra en la reducción de los costes asociados con la tecnología DAC. A pesar de sus ventajas, una de las principales barreras para la adopción de DAC ha sido su elevado costo inicial y operativo. Sin embargo, la integración de DAC en sistemas HVAC existentes podría distribuir estos costos más eficazmente al aprovechar la infraestructura ya instalada. Además, supone un reto adaptar esta tecnología a la infraestructura actual debido a la necesidad de más espacio para una completa instalación de la misma.

4.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es estudiar la viabilidad técnica y económica de integrar tecnología DAC en los sistemas de ventilación y filtración de los edificios con el fin último de no solo mejorar la calidad del aire interior sino también aportar emisiones negativas de CO₂ al ambiente.

Otros objetivos que abarca el proyecto son:

- **Estudio de los diferentes sistemas existentes de DAC**

Se llevará a cabo una investigación de los diferentes procesos que existen actualmente en cuanto a DAC.

- **Evaluación de la viabilidad económica y en términos de la instalación**

Una vez analizada la implementación de tecnología DAC en sistemas de ventilación de edificios, se propondrán otras opciones y mejoras con el fin de lograr un abaratamiento de los costes, mejorar la eficiencia e incrementar la facilidad de la instalación.

- **Evaluación regulatoria y ambiental de la tecnología**

Por último, se evaluará esta tecnología atendiendo a los diferentes criterios medioambientales establecidos en documentos de carácter legal y ambiental como son la Taxonomía Europea y el EPBD.

4.3 PLANIFICACIÓN

A continuación, se muestra la planificación que se ha llevado a cabo a lo largo de la realización del proyecto.

	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Anexo A	Redacción del proyecto	Redacción del proyecto	Redacción del proyecto	Redacción del proyecto	Análisis de conclusiones del proyecto
Investigación de la tecnología de Captura y Almacenamiento de Carbono (CCUS)	Estudio de la tecnología Soletair Power	Análisis de la viabilidad técnica	Análisis de la viabilidad económica	Análisis de la viabilidad económica	Últimas modificaciones del proyecto
Investigación profunda de la tecnología Direct Air Capture (DAC)	Investigación de los sistemas de ventilación y filtración actuales	Conclusiones de la viabilidad técnica	Conclusiones de la viabilidad económica	Conclusiones de la viabilidad económica	Preparar la presentación
Anexo B	Presentación de seguimiento			Conclusiones de la viabilidad regulatoria y medioambiental	

Tabla 4: Planificación del proyecto [Elaboración propia]

Capítulo 5. ANÁLISIS Y ELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DAC

5.1 ELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DAC

De los procesos de captura de CO₂ directa del aire mencionados previamente en el Capítulo 3 se han descartado los métodos más emergentes, es decir, la separación por membranas y la adsorción por electrodos. En el caso de la criogenia, se ha descartado su estudio de viabilidad debido al requerimiento de climas extremadamente fríos y el estudio no se lleva a cabo específicamente en regiones de este tipo.

La razón principal de descartar la separación por membranas y la adsorción por electrodos es que los métodos de adsorción-desorción y absorción, que se denominarán S-DAC y L-DAC respectivamente a partir de ahora, ya se encuentran operando en varias instalaciones a nivel mundial. De hecho, se espera que la primera planta a gran escala de DAC capaz de capturar hasta 1 Mt CO₂ cada año esté operativa en Estados Unidos a mediados de la década actual [7]. Esta rápida expansión, combinada con el potencial de reducción de costes mediante la implementación a gran escala, ofrece una gran ventaja en comparación con los enfoques DAC más experimentales y menos maduros anteriormente mencionados, cuyo desarrollo y demostración aún no han alcanzado el nivel de implementación o la reducción de costes proyectados para este tipo de tecnología.

La menor madurez de las tecnologías DAC emergentes, como la separación por membranas y la adsorción por electrodos, es visible atendiendo a los Niveles de Maduración Tecnológica (TRL por sus siglas en inglés: *Technology Readiness Levels*) que implementó la NASA originariamente para evaluar la tecnología espacial pero que es utilizado en la actualidad para medir el nivel de maduración de cualquier industria o sector tecnológico. Actualmente, la separación por membranas es un TRL 4 o TRL 6 (depende de su aplicación) y, la adsorción

por electrodos un TRL 4, al solo haberse probado a escala de laboratorio [7]. Por lo tanto, atendiendo a la Figura 14, se observa que no disponen de una madurez tecnológica necesaria para su implementación inmediata.

TRL 9	System proven in operational environment
TRL 8	System complete and qualified
TRL 7	Integrated pilot system demonstrated
TRL 6	Prototype system verified
TRL 5	Laboratory testing of integrated system
TRL 4	Laboratory testing of prototype component or process
TRL 3	Critical function, proof of concept established
TRL 2	Technology concept and/or application formulated
TRL 1	Basic principles are observed and reported

Figura 14: Niveles de Maduración Tecnológica (TRLs) establecidos por la NASA [19]

Una vez descartadas las diferentes tecnologías emergentes de DAC se escogerá entre la tecnología S-DAC o L-DAC para su estudio de implementación en sistemas HVAC de edificios. Para ello, se analizarán factores tanto de índole técnica como económica; así como las posibles ventajas y desventajas de cada uno de los enfoques DAC.

A modo de comparación, las principales características técnicas de ambas tecnologías están representadas en la Tabla 4.

	S-DAC	L-DAC
Separación de CO₂	Adsorbente sólido	Solución básica líquida
Consumo de energía específica [GJ/tCO ₂]	7,2 – 9,5	5,5 – 8,8
Consumo de energía térmica	70 – 80 %	80 – 100 %
Consumo de energía eléctrica	20 – 30 %	0 – 20 %
Temperatura en la regeneración	80 – 100 °C	Alrededor de 900 °C
Presión en la regeneración	Vacío	Ambiente
Capacidad de captura	A nivel modular	A gran escala
Necesidad de agua [tH ₂ O/tCO ₂]	(-2) - 0	0 - 50
Emisiones en el ciclo de vida [temitidas/tcapturadas]	0,03 – 0,91	0,1 – 0,4
Coste nivelado de la captura [\$/tCO ₂]	Hasta 600	Hasta 350

Tabla 5: Características técnicas clave de las tecnologías S-DAC y L-DAC [7]

Una vez vistas las características clave de cada tecnología, se analizarán posibles ventajas e inconvenientes de ambos enfoques para, finalmente, escoger uno para su implementación en sistemas HVAC.

Por un lado, el enfoque S-DAC, que utiliza adsorbentes sólidos, destaca por su alta modularidad, permitiendo su implementación en diversas configuraciones y escalas. Esta flexibilidad es fundamental para implementarse en sistemas HVAC existentes, adaptándose a variaciones en el espacio y las configuraciones sin grandes alteraciones en la infraestructura. Además, la tecnología S-DAC opera a temperaturas de regeneración más bajas, entre 80-100 °C, facilitando su compatibilidad con las fuentes de calor de las que generalmente disponen los sistemas HVAC. Estas fuentes de calor podrían utilizarse eficazmente para regenerar el adsorbente, reduciendo así el consumo energético adicional.

Otra ventaja significativa de la adsorción para la captura del CO₂ es su capacidad de generar agua como subproducto durante la captura, contrarrestando la necesidad de insumos de agua adicionales, que sí requiere la tecnología de captura por absorción, y ofreciendo beneficios en regiones con escasez de agua. Además, esta tecnología se alinea con fuentes de energía renovable de baja temperatura, como la solar térmica o geotérmica, ampliamente utilizadas en edificaciones actuales que buscan mejorar la eficiencia energética y reducir la huella de carbono del edificio.

Por otro lado, la tecnología L-DAC, aunque es eficaz para instalaciones a gran escala y con elevada capacidad de captura de CO₂, presenta otros desafíos que limitan su adecuación para sistemas HVAC. Este enfoque requiere temperaturas de regeneración que pueden alcanzar hasta 900°C, lo que implica un mayor consumo energético. Además, la tecnología L-DAC puede llegar a necesitar hasta 50 toneladas de agua por cada tonelada de CO₂ capturado, lo que puede llegar a limitar su implementación en zonas con restricciones de agua o en edificios que buscan optimizar su uso y consumo del agua.

Por lo tanto, queda justificada la elección de la tecnología S-DAC para su estudio de viabilidad de implementación en sistemas HVAC a lo largo de este proyecto. En resumen, la S-DAC ofrece una integración más sencilla y un menor impacto en el consumo tanto

energético como de recursos. Aunque la tecnología L-DAC puede ser preferible en escenarios industriales a gran escala donde la eficiencia en la captura de grandes volúmenes de CO₂ es muy importante, la S-DAC ofrece ventajas, anteriormente mencionadas, que facilitan su uso en entornos edificados, haciendo de esta tecnología una solución más práctica y aparentemente viable para la captura de CO₂ en los sistemas HVAC de los edificios.

5.2 CARACTERÍSTICAS Y COMPONENTES

Como se ha visto anteriormente la tecnología S-DAC se compone de un proceso cíclico de adsorción-desorción.

En la primera fase (adsorción), el material adsorbente captura el CO₂ del aire a temperatura y presión ambiente. El adsorbente está compuesto de poros en su superficie con un área específica elevada que favorece la adsorción. Las propiedades de este material son de suma importancia en la eficiencia del proceso de captura, concretamente su capacidad de adsorción y facilidad de regeneración.

A continuación, se analizarán los materiales adsorbentes que más se utilizan en esta tecnología.

- **Zeolitas**

Las zeolitas, aluminosilicatos cristalinos porosos con estructuras tridimensionales, se componen de una red periódica de tetraedros de óxido de silicio (SiO₄) u óxido de aluminio (AlO₄). Estos materiales son esenciales para la separación de gases, gracias a su capacidad de formar isomorfismo al reemplazar silicio por aluminio en su red, generando así una estructura con carga neta negativa y una elevada afinidad por moléculas cuadrupolares como el CO₂. Dadas sus características de alta disponibilidad, bajo coste, extensa superficie y cavidades porosas, las zeolitas son efectivas como tamices moleculares en la separación del CO₂. Sin embargo, enfrentan desafíos en la capacidad de adsorción y la selectividad CO₂/N₂. La efectividad de la adsorción de las zeolitas varía según su tipo, pero puede mejorarse mediante la adición de aminas. Es importante mencionar que las zeolitas también adsorben humedad, lo que puede requerir un lecho desecante adicional para mantener la capacidad de adsorción en ambientes húmedos [11].

- **Carbón activado**

El carbón activado, así como otros materiales adsorbentes derivados del carbono suelen presentar una amplia gama de tamaños de poro, que incluyen microporos (<2 nm), mesoporos (2–50 nm) y macroporos (>50 nm). Los meso- y macroporos facilitan el transporte de moléculas hacia los microporos, donde ocurre la mayor parte de la adsorción mediante interacciones de fuerzas de van der Waals [11].

Este material adsorbente destaca por su bajo coste, alta área superficial y facilidad de regeneración, lo que lo hace atractivo para aplicaciones de captura de CO₂. Aunque su baja actividad química puede limitar su capacidad de adsorción a bajas presiones parciales de CO₂, diversas estrategias de mejora, como activaciones físicas o químicas, dopado con elementos como nitrógeno u oxígeno, y procesos de carboxilación, pueden ser implementadas para optimizar su desempeño [11].

- ***Metal Organic Frameworks (MOFs)***

Los MOFs son estructuras cristalinas altamente porosas formadas por nodos metálicos unidos a través de ligandos orgánicos mediante fuertes enlaces de coordinación. Una característica destacada de los MOFs es su capacidad de ser diseñados a medida, permitiendo ajustar su superficie, volumen poroso y funcionalidades específicas según las necesidades [11]. Concretamente, el MOF-74 preparado con magnesio se plantea como uno de los materiales más eficaces y con mayor capacidad para capturar CO₂ [20]. Esto es debido a que ha mostrado una capacidad dinámica de captura del 8.9% en peso, una de las más altas registradas para los MOFs, y superando a otros adsorbentes como las zeolitas. Además, la regeneración de este material es notablemente eficiente, pudiendo recuperar hasta el 87% de su capacidad inicial tras un proceso de regeneración a una temperatura relativamente baja de 80 °C. La presencia del magnesio en el material es fundamental para su alta capacidad de selectividad del CO₂ frente a otros gases [21].

A pesar de los beneficios, el coste de los MOFs puede ser prohibitivo para su adopción a gran escala [11].

Otra opción es la de utilizar adsorbentes funcionalizados con amina (*amine-functionalized sorbents*). La inclusión de aminas en el adsorbente mejora la capacidad de captura del CO₂ bajo condiciones húmedas, crucial debido a la variabilidad de la humedad del aire ambiente, y, consecuentemente, la capacidad general de captura. Además, se puede reducir la duración del ciclo adsorción-desorción (4 – 6 horas) y pueden requerir una temperatura de regeneración algo inferior, aunque no es una diferencia notable [22].

La Tabla 6 muestra a modo de resumen las principales características de cada tipo de adsorbente.

Adsorbente	Proceso de Adsorción				Proceso de Desorción			Coste del adsorbente
	Temperatura de adsorción (ambiente)	Presión de adsorción (ambiente)	Capacidad de captura de CO ₂	Selectividad CO ₂ /N ₂	Temperatura de desorción	Presión de desorción	Energía de regeneración	
[-]	[°C]	[bar]	$\left[\frac{mol\ CO_2}{kg\ adsorbente}\right]$	[-]	[°C]	[bar]	$\left[\frac{GJ}{ton.\ CO_2}\right]$	[-]
Zeolita	25	1	0,75 - 4,66	10 - 15	80 - 100	0,1 - 0,2	1,7 - 2,4	Bajo
Adsorbentes con aminas	25	1	0,79 - 14	10 - 20	85 - 95	0,2	0,7 - 1,53	Medio
Carbón Activado	25	1	1,5 - 4,8	2 - 15	80 - 100	0,1 - 0,3	1,3 - 2,5	Bajo
MOF-74 (Mg)	25	1	0,6 - 7,2	3 - 500	135 - 140	1	2,1	Alto

Tabla 6: Características principales de los diferentes materiales adsorbente [23], [24]

En la segunda etapa (desorción), se libera el CO₂ en estado gaseoso y se regenera el material adsorbente. Para la regeneración del adsorbente, se pueden llevar a cabo diferentes procesos que se analizarán a continuación.

- **Adsorción por Oscilación de Temperatura (TSA** por sus siglas en inglés: *Temperature Swing Adsorption*)

El TSA es un proceso de regeneración del adsorbente utilizado previamente en la fase adsorción, en el que, mediante un incremento de la temperatura (alcanzando 80-100 °C), desorbe el CO₂ del adsorbente sólido. Además, este proceso permite utilizar CO₂ puro como gas de arrastre (*stripping*) para incrementar la eficiencia de la desorción y lograr que el CO₂ desorbido sea de alta pureza [11].

Una forma efectiva de calentar el adsorbente es mediante un intercambiador de calor. Se ha demostrado que, bajo las mismas condiciones de operación, la eficiencia del proceso es mejor utilizando un intercambiador de calor de tres tubos frente a un intercambiador de tubo único. Además, el rendimiento de la separación del CO₂ se ve favorecido con una mayor porosidad del adsorbente y por un incremento de la velocidad de entrada del aire en el adsorbente [25].

- **Adsorción por Oscilación de Presión (PSA** por sus siglas en inglés: *Pressure Swing Adsorption*)

El PSA es otro proceso de regeneración que consiste en la reducción de la presión en el recipiente donde se encuentra el adsorbente sólido para liberar efectivamente el CO₂ capturado del mismo. Concretamente para el caso que abarca el proyecto, al tratar de implementar este proceso a nivel de edificios, se cree que proceso de adsorción por oscilación de vacío (**VSA** por sus siglas en inglés: *Vacuum Swing Adsorption*) sería más interesante ya que resulta más eficiente energéticamente para proyectos a pequeña escala.

El VSA se engloba dentro de los PSA y la principal diferencia es que la regeneración se lleva a cabo bajo presiones mucho más bajas, llegando a utilizar una presión de vacío para ciertos adsorbentes. Sin embargo, esta diferencia de presiones requiere de una cantidad significativa de energía que se traduce en un incremento de los costes de captura del CO₂ [11].

- **Adsorción por Oscilación de Temperatura y Vacío (TVSA por sus siglas en inglés: *Temperature-Vacuum Swing Adsorption*)**

El método TVSA (Figura 15) consiste básicamente en una combinación de los dos métodos anteriores. Una vez el material adsorbente se encuentra saturado de CO₂ se incrementa la temperatura del lecho donde se sitúa. A continuación, se aplica un proceso de vacío o reducción máxima de la presión al lecho de manera que se libera el CO₂ restante del adsorbente. Por último, una vez ha sido desorbido el CO₂, se procede con un enfriamiento del sistema, idealmente a la temperatura de la primera fase de adsorción (normalmente la temperatura del ambiente), acompañado de una restauración de la presión a la del ambiente para poder comenzar otro ciclo de captura.

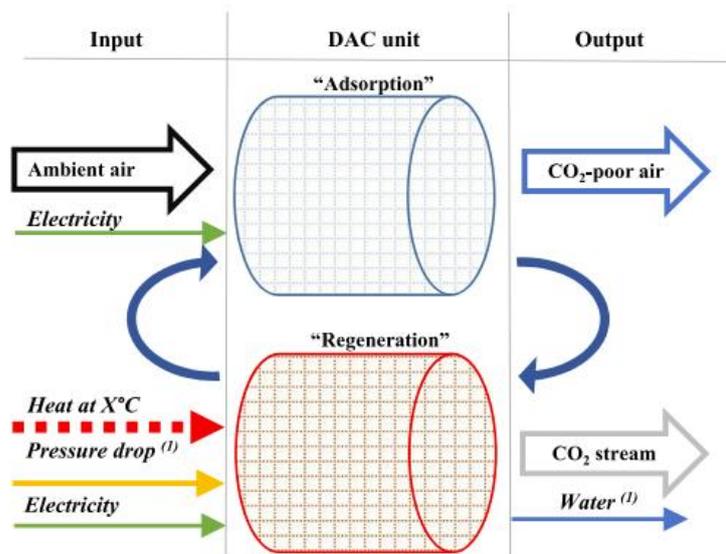


Figura 15: Esquema básico del proceso TVSA para la regeneración del adsorbente [26]

Con la adopción de las dos etapas (TSA y VSA) en este proceso, en comparación con llevar a cabo únicamente una etapa TSA o VSA, se logra:

- **Incremento de la pureza del CO₂ desorbido**

Al aplicar dos etapas continuas de desorción, el CO₂ final obtenido es de muy alta pureza; llegando incluso a lograr un 99% de pureza en más del 90% del CO₂ liberado en el proceso [27].

- **Aumento de la eficiencia en la regeneración del adsorbente**

Combinando aporte de calor y vacío se logra reducir la energía necesaria para la desorción del CO₂ debido a, por ejemplo, la posibilidad de utilizar una temperatura inferior a la que se utilizaría típicamente en un proceso TSA, entre otros factores [28].

- **Incremento de la productividad del CO₂**

Esta consecuencia es derivada de la anterior ya que la mejora en la regeneración del adsorbente facilita la ejecución de ciclos más rápidos y efectivos, incrementando así las cantidades de CO₂ producido por unidad de masa del adsorbente. Particularmente, un estudio de la viabilidad de integrar purgas de vapor en el proceso TVSA ha demostrado que se puede reducir el tiempo de procesamiento y aumentar la cantidad diaria de CO₂ desorbido [29], como se mencionaba anteriormente.

5.3 PRINCIPALES EMPRESAS COMERCIALIZADORAS

A continuación, se llevará a cabo un análisis de las principales compañías que actualmente comercializan la tecnología s-DAC, así como de su producto, con el fin de obtener un enfoque global y una base actualizada de esta tecnología.

5.3.1 CLIMEWORKS

Climeworks es una empresa suiza fundada en 2009 líder en el sector de desarrollo de tecnología DAC. Su diseño para S-DAC es escalable y modular. Utilizan un adsorbente funcionalizado con amina, concretamente 3-aminopropilmetildietoxisilano (APDES), cargado en celulosa nano fibrilada (NFC), conocido como APDES-NFC-FD. Por otro lado, la regeneración se lleva a cabo mediante TVSA a una temperatura de 100 °C. El ciclo completo duraría entre 4 y 6 horas. Una vez capturado el CO₂, esta compañía opta por su almacenamiento geológico mediante la mineralización a través de la colaboración una empresa finlandesa, Carbfix [11].

A partir de 2019, la empresa capturaba CO₂ a un coste de 600 – 800 \$/tCO₂, pero tiene un plan para reducirlo a 100 – 150 \$/tCO₂ para 2030 [11].

5.3.2 GLOBAL THERMOSTAT

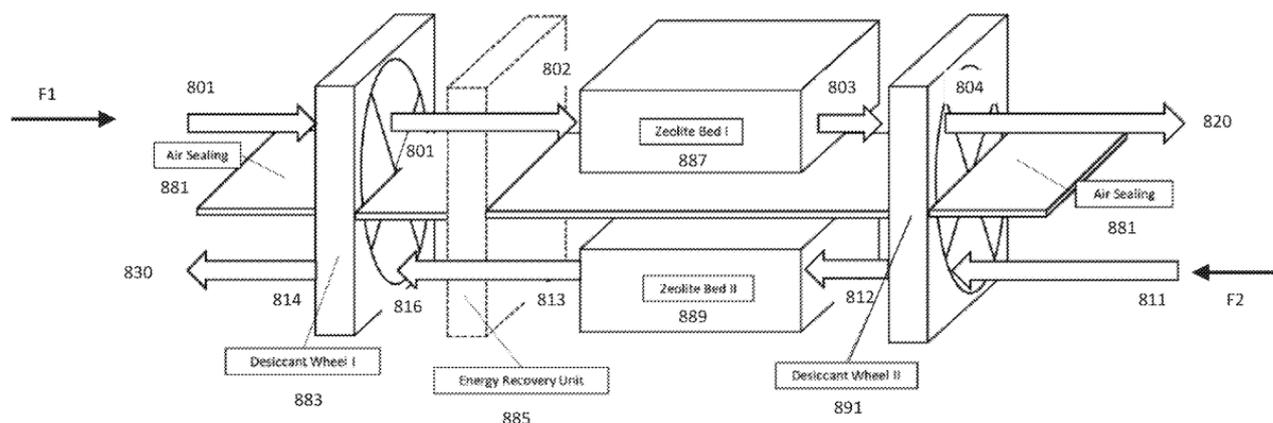
Global Thermostat es una compañía americana que se fundó en 2010. La empresa utiliza un polímero funcionalizado con amina de Clase I en una estructura monolítica de cerámica porosa en forma de panel para la captura. El proceso de regeneración se realiza por TVSA con una temperatura de desorción de 60 °C a 120 °C pero, preferiblemente, por debajo de 100 °C, y una presión máxima de 0,2 bar. La pureza de la captura de CO₂ global del proceso supera un 95% [11].

En 2023, revelaron una planta de demostración a escala comercial de 1000 tCO₂/año en Colorado; sin embargo, el coste y el consumo energético para la planta no han sido revelados. Entre sus planes futuros, la compañía cree que pueden alcanzar un coste de captura de 300 \$/tCO₂ en 2025 [11].

5.3.3 CARBON CAPTURE

Carbon Capture Inc. es una compañía americana que se fundó en 2019 que implementa y comercializa sistemas S-DAC altamente modulares diseñados para la fabricación en gran volumen y ciclos de desarrollo más rápidos. Aunque la empresa dispone de patentes para usar zeolitas como adsorbente, han diseñado su sistema para aceptar una variedad de adsorbentes, incluyendo, aminas y MOFs. Se utiliza el TVSA como proceso de regeneración de las zeolitas [11].

El sistema S-DAC de *Carbon Capture* está diseñado para operar en configuraciones de al menos dos unidades para mitigar el efecto de la afinidad por el agua de las zeolitas. Inicialmente, el aire que entra se procesa a través de una rueda desecante giratoria que retira entre el 80 y el 95% de la humedad. Posteriormente, el primer módulo DAC captura tanto el CO₂ como la humedad residual. La regeneración del desecante se lleva a cabo mediante un proceso inverso de oscilación de aire seco, en el cual el aire seco que sale del segundo módulo DAC circula a través de la primera rueda desecante. Este método utiliza la diferencia en la concentración de agua entre el desecante y el aire saliente, en lugar de depender de la energía térmica. La rueda desecante correspondiente al segundo flujo se regenera con el aire que sale del primer módulo DAC. Finalmente, la humedad acumulada en ambos desecantes se expulsa al aire ambiente [11].



5.3.4 SOLETAIR POWER

Soletair Power es una compañía finlandesa fundada en 2016 y es la que comercializa la tecnología s-DAC cuya viabilidad se va a estudiar más adelante.

Esta tecnología se basa en unidad S-DAC que se integra directamente en los sistemas HVAC de los edificios, operando bajo un diseño modular y de fácil instalación. Cada unidad es capaz de capturar hasta 20 tCO₂/año al año. Este sistema ajusta el tiempo de funcionamiento de la ventilación en función de los niveles de CO₂, optimizando así la eficiencia energética del sistema HVAC del edificio en cuestión. Esta tecnología es escalable ya que permite aumentar la capacidad de captura añadiendo más de una unidad según sea necesario. Utiliza un adsorbente sólido funcionalizado con aminas y, en cuanto a la regeneración de este, se lleva a cabo un proceso TVSA [30].

Durante la operación, el aire de entrada es primero deshumidificado en un 80-95% mediante una rueda desecante rotativa antes de pasar por los módulos de captura. Una vez que los filtros de adsorbente están saturados con CO₂, se cierran y se regeneran mediante TVSA (90°C). El sistema puede operar eficientemente con temperaturas externas de 0° a 25°C y puede utilizar calor residual, por ejemplo, de salas de servidores, para mantener las condiciones de operación óptimas. El análisis de la fuente de calor residual para la tecnología es también uno de los retos a estudiar a continuación. [31].

Compañía	Adsorbente	Proceso de Regeneración - Desorción	Capacidad	Coste de captura	País de origen
			[CO ₂ /año]	[\$/t CO ₂]	
CLIMEWORKS	Celulosa nanofibrilada funcionalizada con amina	TVSA	6,9 kt (2023) 42,9 kt (proy. 2024)	600-800 (act.) 100 (2030)	Suiza
GLOBAL THERMOSTAT	Polímero funcionalizado con amina	TVSA	1 kt (act.) 100 kt (2025)	300 (2025)	Estados Unidos
CARBON CAPTURE	Zeolita	TVSA	5 Mt (2030)	[-]	Estados Unidos
SOLETAIR POWER	Perlas esféricas de poliestireno funcionalizadas con amina	TVSA	20 t (act.)	[-]	Finlandia

Tabla 7: Principales Empresas que comercializan la tecnología S-DAC [11]

5.4 COMPARACIÓN ECONÓMICA CON TECNOLOGÍAS ALTERNATIVAS EN LA DESCARBONIZACIÓN DE EDIFICIOS

Como se ha visto anteriormente, el coste de la tecnología S-DAC depende, principalmente, de:

- Adsorbente y equipos.
- Proceso de desorción/regeneración.
- Fuente de energía para la regeneración (electricidad y calor a baja temperatura).

El coste estimado de la tecnología en la actualidad está en el rango de 100-600 \$/ton CO₂ capturada [32], dependiendo de la capacidad de la planta. Sin embargo, en el caso del proyecto se estudiará a nivel modular para implementación en edificios, por lo que tendrá un coste nivelado de captura distinto.

Además, existen otras medidas de descarbonización de edificios con un coste más reducido. Por ejemplo, el coste de emisiones evitadas de la energía solar, con el uso de paneles solares, se estima en un rango de (-3)-92 \$/ton. CO₂ evitada [33]; como se observa el estudio que representa la Figura 16.

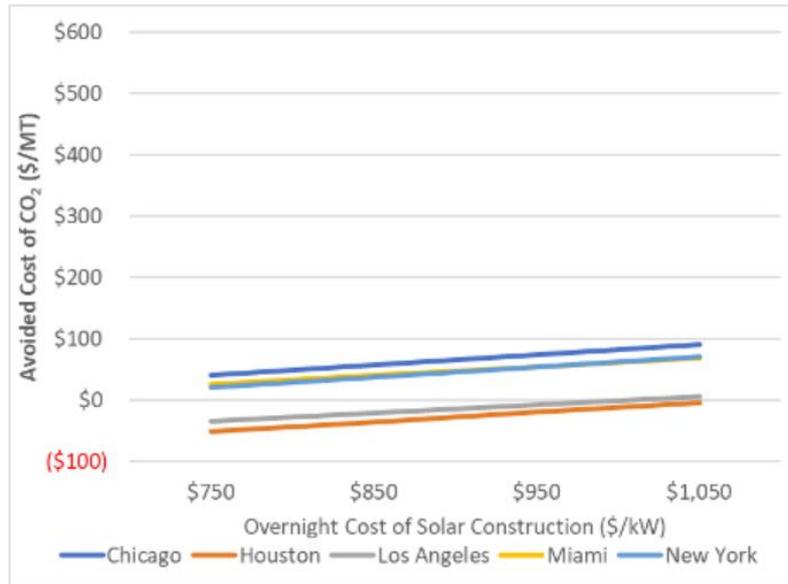


Figura 16: Estudio del coste de emisiones de CO2 evitadas en 4 ciudades americanas [33]

5.5 POSIBLES ESCENARIOS PARA SU IMPLEMENTACIÓN

A continuación, se presentan dos escenarios principales para la implementación de esta tecnología: en la construcción de nuevos edificios y en el retrofit de edificios existentes.

5.5.1 ESCENARIO I: EDIFICIO NUEVO

En el caso de nuevos proyectos de construcción, la integración de S-DAC en el diseño del sistema HVAC puede ser optimizada desde la fase de planificación. Este enfoque permite una mayor relación entre la captura de CO₂ y la gestión de la CAI.

En este escenario, el diseño del sistema HVAC puede incluir de manera estratégica las unidades modulares para maximizar la eficiencia energética y la captura de CO₂. Se podría configurar el sistema para que utilice el calor residual de la captura de CO₂ para la calefacción del edificio cuando sea necesario, o para mejorar la eficiencia del enfriamiento utilizando el aire tratado. Además, la opción de implementar un sistema de control automático e inteligente (BMS) que ajuste el funcionamiento del S-DAC y del sistema HVAC según las condiciones en tiempo real (tanto externas, como temperatura o humedad, como internas, niveles de CO₂ y ocupación en el edificio o sala) puede maximizar la eficiencia y reducir los costes operativos.

5.5.2 ESCENARIO II: RETROFIT DE EDIFICIO

La implementación de esta tecnología en edificios existentes implica una dificultad superior al escenario anterior. La adaptación y actualización de los sistemas HVAC para incluir la tecnología de captura de CO₂ puede ser complicada por las limitaciones en cuanto a estructura y operación del edificio ya existentes.

Para el retrofit es necesario realizar una auditoría energética y de infraestructura para determinar la viabilidad de integrar la tecnología S-DAC, evaluando diversos aspectos entre los que se destacan el espacio disponible, la capacidad del sistema HVAC existente, y la necesidad de modificaciones o actualizaciones.

En la mayoría de los casos, será necesario reemplazar o modificar significativamente partes del sistema HVAC para implementar la nueva tecnología y lograr una operación eficiente (instalar una bomba de calor, por ejemplo). La integración debe diseñarse de manera que la captura complemente el funcionamiento del sistema HVAC existente.

Capítulo 6. ESTUDIO DE LA VIABILIDAD TÉCNICA

En este apartado se estudiará la viabilidad técnica de la tecnología, incluyendo la elección del adsorbente y del proceso de generación, elaboración de un esquema genérico y la estimación de la demanda energética. Además, se estudiará en un apartado la viabilidad de la instalación en términos de espacio y tamaño del módulo, así como la elección de donde puede ir conectado el módulo.

6.1 ADSORBENTE

En la Tabla 6 se observa que los adsorbentes funcionalizados con aminas incrementan notablemente la capacidad de captura del CO₂ en comparación con zeolitas y MOFs. Además, el hecho de que no sea un material muy caro ayuda a la elección.

Por lo tanto, se seleccionará un **polímero funcionalizado con aminas**, concretamente, el adsorbente **Lewatit® VP OC 1065**, que ha demostrado ser eficiente en un proceso TVSA [34] (en el siguiente apartado se justifica su elección) y es el adsorbente del que más información hay en la literatura. Está compuesto de un soporte de esferas de poliestireno con unidades funcionales de amino bencilo primario. Las ventajas principales de utilizar este tipo de adsorbente, que reducen notablemente la demanda energética del mismo, se enumeran a continuación:

- Alta capacidad de captura de CO₂, permitiendo obtener CO₂ de alta pureza.
- Bajo calor requerido en la adsorción.
- Relativamente baja temperatura de regeneración, en comparación con el resto de adsorbentes.
- Incremento del ritmo del ciclo.

Condiciones de adsorción	Concentración de CO ₂	Capacidad de adsorción por ciclo TVSA	Condiciones de desorción	Coste	Vida útil	
	[ppm]	[mol CO ₂ /kg adsorbente]		[€/100g]	[años]	[ciclos TVSA]
25°C 1 bar	400	5	90 – 100°C 0,3 bar	45	10-15	1.000 – 10.000

Tabla 8: Principales características del adsorbente [34], [35]

6.2 PROCESO DE ADSORCIÓN-DESORCIÓN

Para el adsorbente seleccionado, es necesario un incremento de temperatura acompañado de una disminución de la presión. Por lo tanto, el proceso de desorción ideal para esta tecnología es el **TVSA**.

El ciclo TVSA, como se ha visto anteriormente, se compone de las siguientes fases (Figura 17):

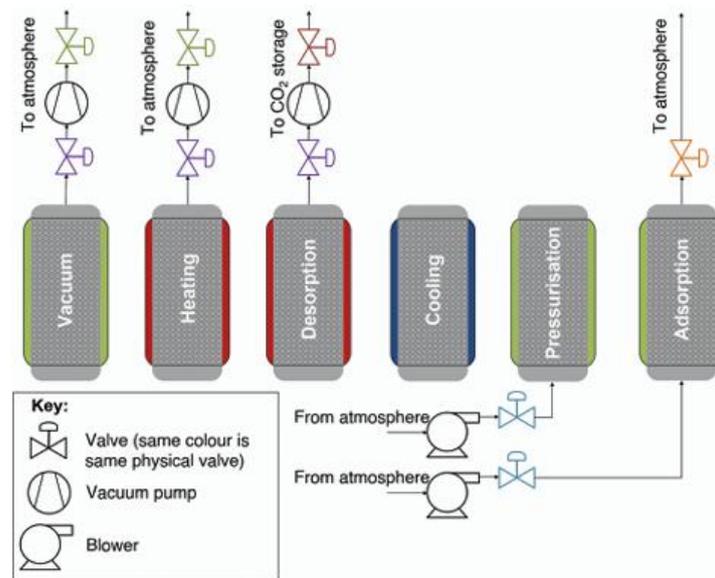


Figura 17: Ciclo típico TVSA [36]

- **Adsorción**

En esta fase, el flujo de aire ambiente circula a través del lecho de adsorbente donde éste captura selectivamente las moléculas de CO₂, que se adhieren a la superficie del mismo. Para este proceso son ideales temperaturas bajas para que sea más eficiente. Sin embargo, con el objetivo de ahorrar gasto energético se llevará a cabo a las condiciones del ambiente, evitando así un enfriamiento “extra” del sistema.

Duración aproximada [27]: 2 horas

- **Calentamiento**

El material adsorbente se calienta para facilitar la desorción de los componentes adsorbidos. En esta fase, se incrementa la temperatura del lecho adsorbente, reduciendo su capacidad de adsorción y facilitando la posterior liberación del CO₂. El objetivo de esta fase es preparar el lecho adsorbente para la desorción al disminuir su afinidad por los adsorbatos.

Duración aproximada [27]: 15 minutos

- **Desorción**

Es la fase de liberación del CO₂ capturado gracias al calentamiento previo. Además, el adsorbente se regenera durante este proceso.

Duración aproximada [27]: 2 horas 30 minutos

- **Presurización/Vacío**

En esta fase se ajusta la presión del sistema para facilitar la preparación para el siguiente ciclo de adsorción. El objetivo es reducir la presión para ayudar a extraer completamente los componentes desorbidos e incrementar la eficiencia de la desorción.

Duración aproximada [27]: 15 minutos

- **Enfriamiento**

En esta última fase se enfría el lecho adsorbente para restablecer la temperatura óptima para la adsorción en el siguiente ciclo.

Duración aproximada [27]: 1 hora

	Duración del proceso
Adsorción	2 horas
Calentamiento	15 minutos
Desorción	2 horas 30 minutos
Presurización/Vacío	15 minutos
Enfriamiento	1 hora
CICLO TVSA	6 horas

Tabla 9: Tiempos de las fases del ciclo TVSA [Elaboración Propia]

6.3 *MÓDULO DAC*

Como se ha visto anteriormente, se ha optado por el adsorbente funcionalizado con aminas **Lewatit® VP OC 1065** y un ciclo desorción-regeneración **TVSA**. El único módulo S-DAC para uso en edificios que se comercializa actualmente es el de la compañía finlandesa *Soletair Power*.

Los datos más relevantes del módulo y su funcionamiento se presentan a continuación:

- **Caudal de ventilación UTA estándar:** hasta $3,3 \text{ m}^3/\text{s} \approx 12.000 \text{ m}^3/\text{h}$
- **Capacidad de captura:** $50 \text{ kg CO}_2/\text{día} \approx 20 \text{ toneladas CO}_2/\text{año}$
- **Tiempo de funcionamiento:** 12 h/día , en otras palabras, 2 ciclos TVSA completos al día (6h cada ciclo, Tabla 9).
- **Cantidad de adsorbente:** $\sim 5 \text{ kg/año}$
- **Dimensión del módulo:** $3 \times 3 \times 3 \text{ m}$
- Incluye sistema **BMS** (*Building Management System*) para monitorizar y controlar la ventilación del edificio acorde a los niveles de CO_2 , derivando en reducción de consumo energético.



Figura 18: Módulo DAC-HVAC de Soletair Power [37]

El módulo deberá ir conectado a la Unidad de Tratamiento de Aire (UTA) del edificio, concretamente, al conducto por el que circula la corriente de aire exterior. Se podrían instalar cuantos módulos como requiera la propiedad del edificio y, actualmente, la media se encuentra en **5 módulos por edificio**, acorde a la información aportada por *Soletair Power*.

Sin embargo, debido al gran tamaño del módulo en comparación con las dimensiones estándares de las diferentes UTAs en España (Figura 19), sería necesario llevar a cabo un retrofit del sistema HVAC del edificio en cuestión, por lo que la instalación del módulo podría llevar de 1 a 3 meses además de incrementar notablemente el coste de la tecnología.

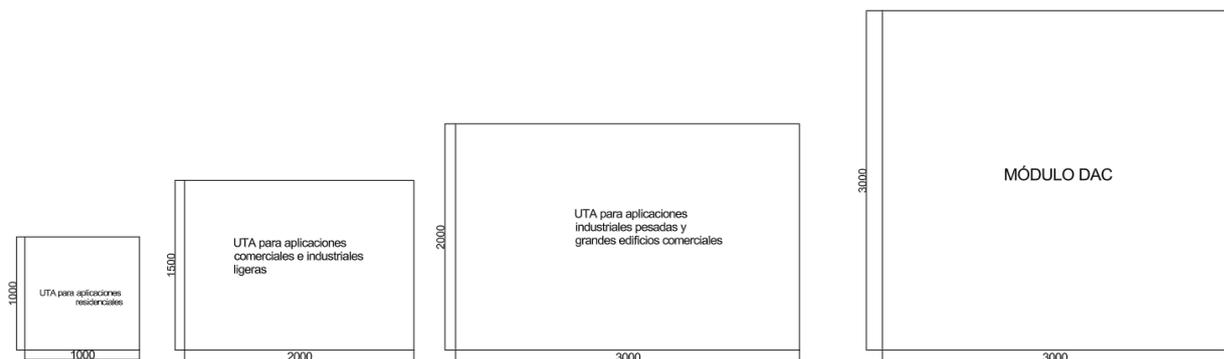


Figura 19: Comparación de las dimensiones del módulo frente a las dimensiones de las UTAs [Elaboración propia, cotas en mm]

Por tanto, con el objetivo de disminuir costes y tiempo en la instalación se va a estudiar la implementación de módulos más pequeños y distribuidos en el edificio (Figura 20). Además, con el objetivo de no disminuir notablemente la eficacia de captura de CO₂, se cambiará la ubicación del módulo de forma que esté conectado a su entrada tanto el conducto de aire exterior como el de aire de retorno.



Figura 20: Módulo S-DAC a implementar [Elaboración propia, Blender]

La implementación de la captura al aire de retorno se debe a que, al estar el CO₂ más concentrado (800-1000 ppm frente al aire exterior, 400-500 ppm), mejorarían las capacidades de captura del módulo. Además, otro uso del módulo es el de purificar el aire mediante la recirculación del del mismo a través del equipo. Finalmente, tras cerrarse las compuertas y llevarse a cabo el ciclo TVSA, mediante la acción de un motor eléctrico se impulsa el aire libre de CO₂ por el conducto de aire de impulsión y, el CO₂ capturado se evacuaría por otro conducto gracias a la acción de una bomba de vacío. El conducto de evacuación de CO₂ llegaría a un contenedor donde se almacenaría de forma temporal. (Figura 21).

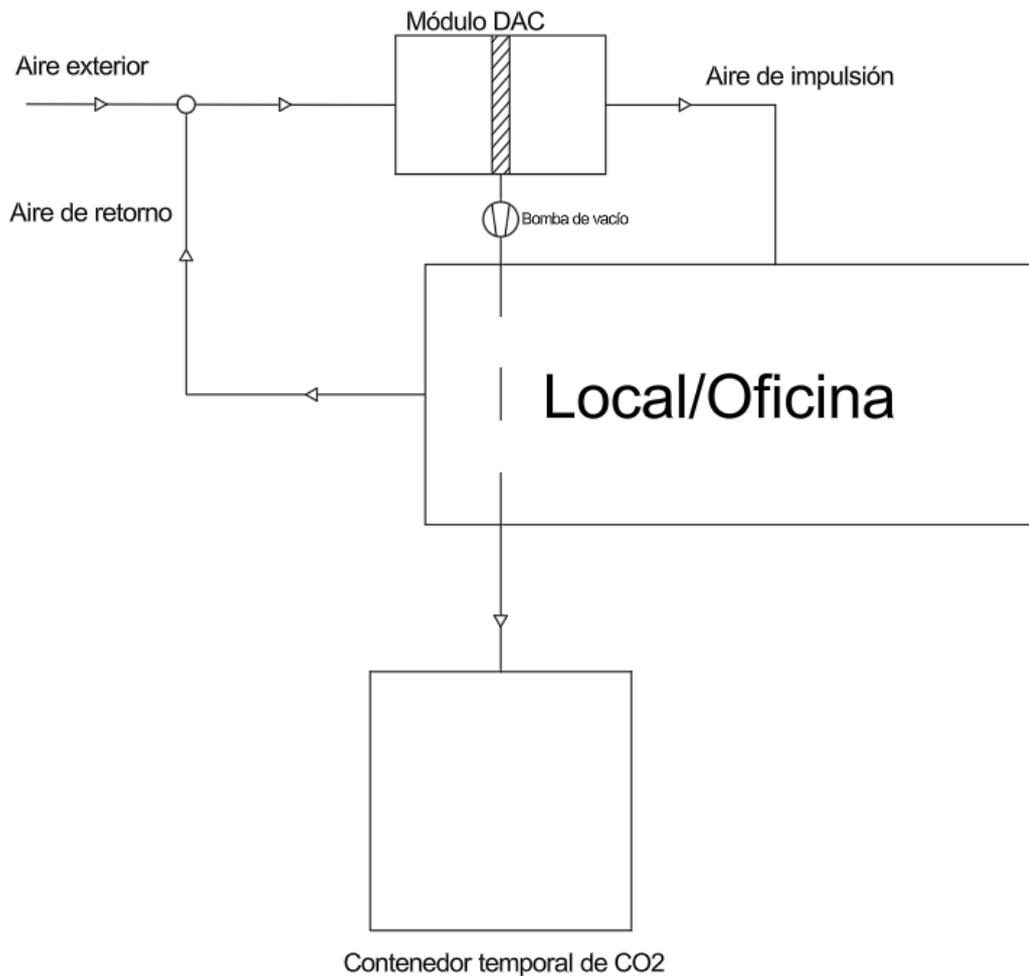


Figura 21: Esquema genérico de la implementación de la tecnología [Elaboración propia]

En lo referente a la instalación, al disponer de módulos más pequeños se llevaría cabo en un período más corto de tiempo y se podrían instalar tantos como requiera la propiedad del edificio. Por tanto, la ubicación del dispositivo sería atornillado en el techo del local u oficina en cuestión debido a la facilidad de conexión con los conductos de aire. En el caso de que hubiese falso techo, se instalaría por encima del mismo pero atornillado al techo original. A continuación, se muestra como quedaría el módulo instalado.



Figura 22: Módulo instalado en falso techo, vista frontal conducto de impulsión [Elaboración propia, Blender]

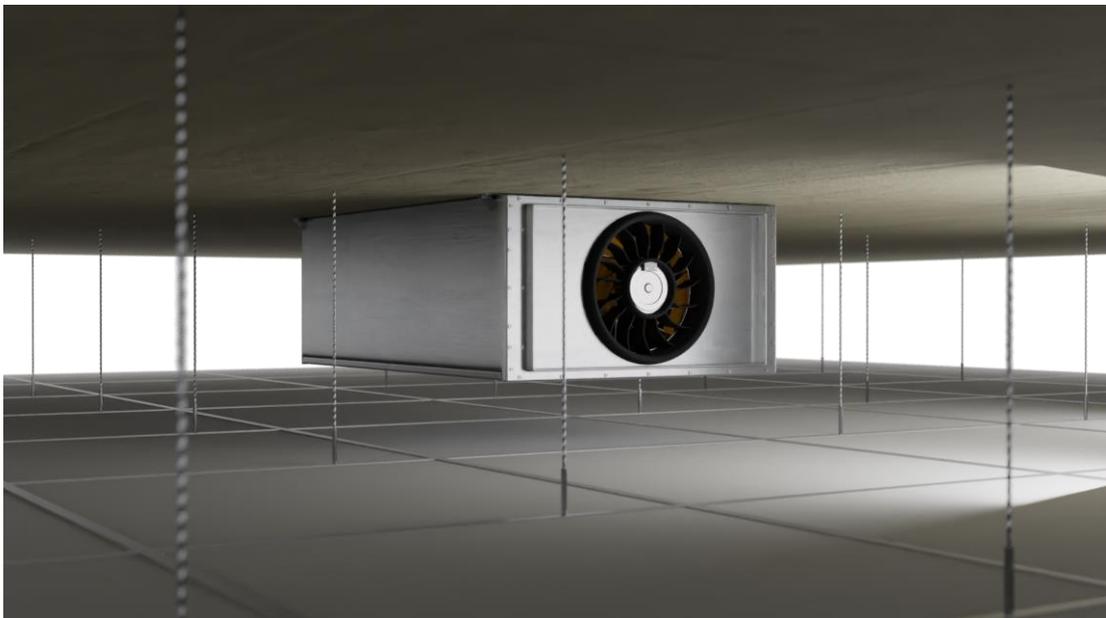


Figura 23: Módulo instalado en falso techo, vista lateral-izquierda conducto de impulsión [Elaboración propia, Blender]



Figura 24: Módulo instalado en falso techo, vista lateral-derecha conducto de impulsión [Elaboración propia, Blender]



Figura 25: Módulo instalado en falso techo, vista lateral-izquierda conducto de entrada [Elaboración propia, Blender]

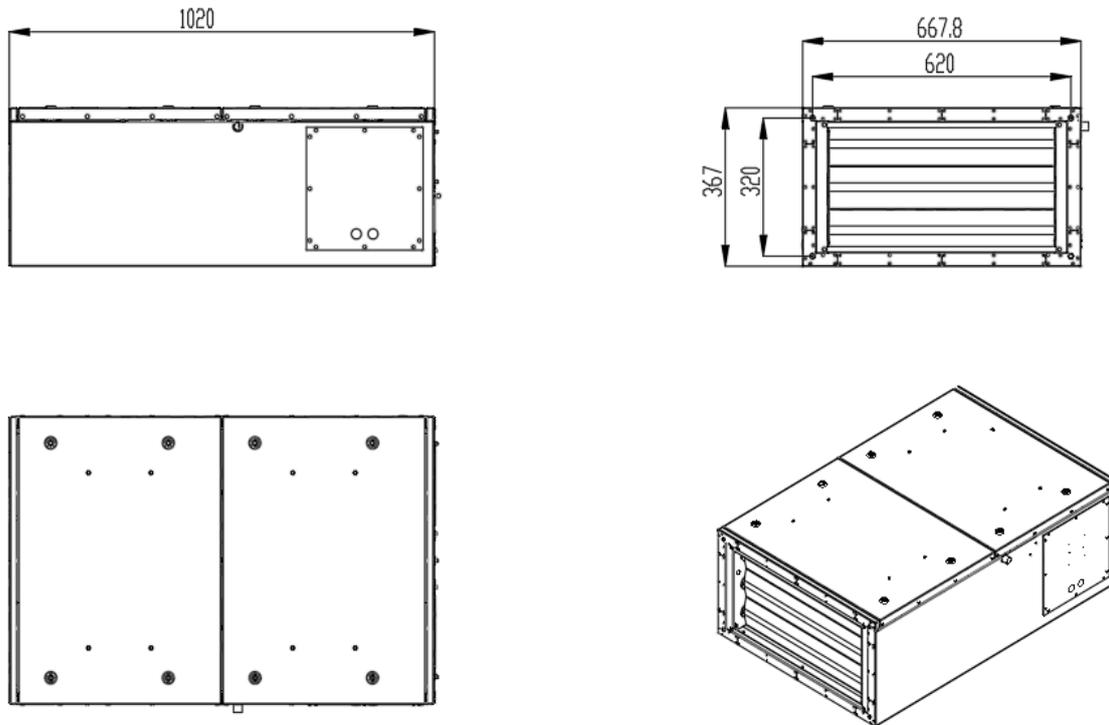


Figura 26: Dimensiones del nuevo módulo [Elaboración propia, AutoCAD]

Por un lado, al haber decrementado notablemente la dimensión del módulo, también le ocurrirá a la cantidad de adsorbente. De esta forma, se ha estimado una cantidad de adsorbente Lewatit® VP OC 1065 de **2,5 kg/año**.

Por otro lado, se mejora la capacidad de captura del adsorbente frente al módulo original. Esto se debe a que, como se ha mencionado anteriormente, la corriente de aire de entrada es mezcla de aire exterior y aire recirculado. Por tanto, se estima una mejora conservadora en la capacidad de captura de un **65%**, alcanzando una capacidad de:

$$1,65 * 5 \frac{\text{mol } CO_2}{\text{kg}_{\text{adsorbente}}} = 8,25 \frac{\text{mol } CO_2}{\text{kg}_{\text{adsorbente}}}$$

Además, con la intención de optimizar y automatizar el proceso se cree conveniente incrementar el tiempo de funcionamiento 1 ciclo más. Por lo tanto, se llevarán a cabo **3 ciclos TVSA** al día.

Con estos nuevos *inputs* (Masa molecular del CO₂ = 44 g/mol) se estima la nueva capacidad de captura del módulo propuesto (no se han tenido en cuenta otros parámetros que pueden modificar ligeramente este resultado como la velocidad o el caudal de aire):

- Capacidad de captura por ciclo

$$8,25 \frac{\text{mol CO}_2}{\text{kg}_{\text{adsorbente}}} * 44 \frac{\text{g CO}_2}{\text{mol CO}_2} * 2,5 \frac{\text{kg}_{\text{adsorbente}}}{\text{ciclo}} = \mathbf{907,5 \frac{\text{g CO}_2}{\text{ciclo}}}$$

- Capacidad de captura anual

$$907,5 \frac{\text{g CO}_2}{\text{ciclo}} * 3 \frac{\text{ciclos}}{\text{día}} * 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 993,7 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{año}} \approx \mathbf{1 \frac{\text{ton CO}_2}{\text{año}}}$$

Resulta interesante comentar que al haber incrementado la modularidad de la tecnología, la implementación de esta tecnología a gran escala resulta interesante ya que se incrementaría notablemente el número de módulos por edificio y, consecuentemente, la cantidad de CO₂ capturado. Por tanto, se va a estimar una media de 40 módulos por edificio.

Finalmente, los datos más relevantes del módulo se listan a continuación:

- **Capacidad de captura:** ~ 1 tonelada CO₂/año
- **Tiempo de funcionamiento:** 18 h/día, en otras palabras, 3 ciclos TVSA completos.
- **Cantidad de adsorbente:** ~ 2,5 kg/año
- **Dimensión del módulo:** ~ 0,4x0,7x1 m
- **Motor EC** para la impulsión: 0,135 kW
- Media de **40 módulos** por edificio

- Malla térmica.
- **Bomba de vacío:** DVI 205 M de Pfeiffer Vacuum
 - Potencia máxima: 10W
 - Presión máxima: 1000 mbar
 - Coste: 850 €
 - Vida útil: 2.000.000 de ciclos



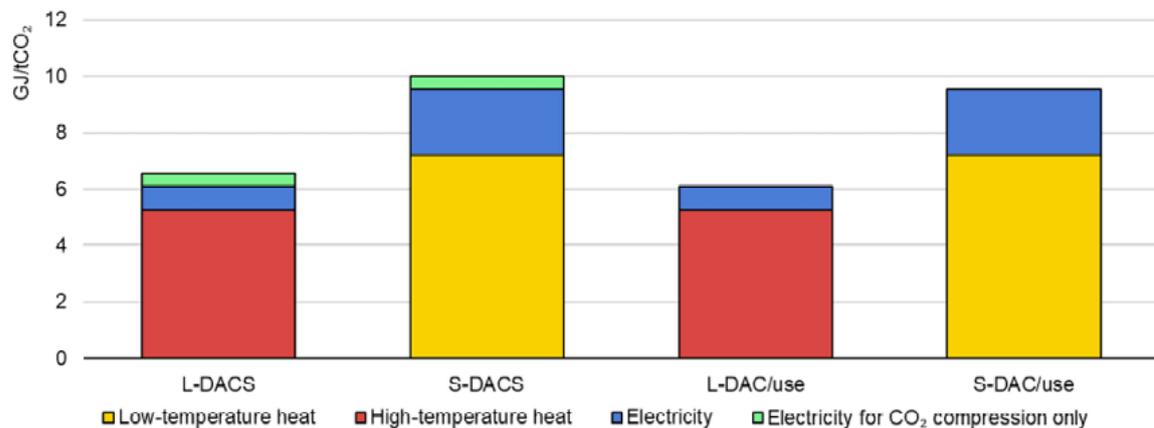
Figura 27: Bomba de vacío de Pfeiffer Vacuum [38]

6.4 DEMANDA ENERGÉTICA DEL PROCESO

En este apartado se va a llevar a cabo la estimación de la demanda energética, térmica y eléctrica, del proceso de captura de CO₂ del módulo.

Generalmente, tanto el S-DAC como el L-DAC requieren mayoritariamente energía térmica, como se puede observar en la Figura 28, de tal forma que el 70-80% correspondería a este tipo de energía (adsorción, desorción, presurización...), dejando un 20-30% de requerimiento eléctrico (bomba de vacío, motor EC, BMS...).

Energy needs of DACs and DAC with CO₂ use by technology and CO₂ destination



IEA. All rights reserved.

Figura 28: Demanda energética general de procesos DAC [7]

A continuación, se estimará de forma separada ambos requerimientos energéticos.

6.4.1 DEMANDA TÉRMICA

Para la estimación de la demanda de calor, se dispone de los datos indicados en la Tabla 10.

	Símbolo	Valor	Unidades
Capacidad calorífica del adsorbente	$C_{P,adsorbente}$	1,5	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$
Capacidad calorífica del CO₂	C_{P,CO_2}	0,85	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$
Masa Molecular del CO₂	MM_{CO_2}	0,044	$\frac{kg}{mol}$
Calor de reacción	ΔH_r	14,84 [Ec. Claussius- Clapeyron]	$\frac{kJ}{mol}$
Temperatura de adsorción	$T_{adsorción}$	25	°C
		373	K
Temperatura de desorción	$T_{desorción}$	100	°C
		298	K
Presión de entrada de la bomba de vacío	P_1	0,3	bar
Presión de descarga de la bomba de vacío	P_2	1	bar
Constante de los gases ideales	R	8,314	$\frac{J}{mol \cdot K}$
Capacidad de captura estimada	Δq_{est}	8,25	$\frac{mol CO_2}{kg adsorbente}$

Tabla 10: Datos para la estimación de la demanda energética de calor [Elaboración propia], [39]

Para este análisis se emplearán las propiedades materiales (Tabla 10) y las fórmulas específicas necesarias para calcular el calor sensible del adsorbente y del CO₂, el calor de reacción del CO₂ y la energía de compresión del proceso, que se considerará adiabática con el fin de simplificar los cálculos.

Calor sensible

a) Adsorbente

El calor sensible necesario para elevar la temperatura del adsorbente se calcula con la siguiente expresión:

$$Q_{adsorbente} = m_{adsorbente} \cdot C_{p,adsorbente} \cdot (T_{desorción} - T_{adsorción}) \quad (1)$$

Donde:

$$m_{adsorbente} = \frac{1}{\Delta q_{est} \cdot MM_{CO_2}} \quad (2)$$

De la expresión (2) se obtiene la masa de adsorbente necesaria para capturar 1 kg de CO₂:

$$m_{adsorbente} = \frac{1}{8,25 \frac{mol CO_2}{kg adsorbente} \cdot 0,044 \frac{kg CO_2}{mol CO_2}} = 2,75 kg$$

Además, esta cantidad de adsorbente es la que se utilizará a lo largo de un año debido a su extensa vida útil y a su regeneración constante. En el apartado anterior, se había estimado una cantidad de 2,5 kg demostrando una estimación muy próxima. Sin embargo, a partir de ahora se utilizará la masa calculada, es decir, **2,75 kg de adsorbente**.

Seguidamente, se halla la demanda de calor final del adsorbente mediante la fórmula (1):

$$Q_{adsorbente} = 2,75 \frac{kg_{ads}}{kg CO_2} \cdot 1,5 \frac{kJ}{kg_{ads} \cdot K} \cdot (100 - 25) = 309,4 \frac{kJ}{kg CO_2}$$

b) CO₂

El calor sensible que involucra la liberación de CO₂ se halla mediante la expresión (3).

$$Q_{CO_2} = C_{P,CO_2} \cdot (T_{desorción} - T_{adsorción}) \quad (3)$$

Por tanto:

$$Q_{CO_2} = 0,85 \frac{kJ}{kg_{CO_2} \cdot K} \cdot (100 - 25) = 63,8 \frac{kJ}{kg_{CO_2}}$$

Calor de reacción del CO₂

Debido a que la reacción de desorción del CO₂ de la amina es endotérmica, se requiere energía para la reacción. Dicha cantidad de energía requerida se calcula siguiendo la expresión (4).

$$Q_{reacción} = \frac{\Delta H_r}{MM_{CO_2}} \quad (4)$$

De esta forma:

$$Q_{reacción} = \frac{14,84 \frac{kJ}{mol_{CO_2}}}{0,044 \frac{kg_{CO_2}}{mol_{CO_2}}} = 337,3 \frac{kJ}{kg_{CO_2}}$$

Calor de compresión

Por último, se calcula la energía necesaria para decrementar la presión del módulo, mediante la expresión (5), donde, como se ha mencionado anteriormente, se ha considerado una reacción de compresión adiabática.

$$Q_{compresión} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\gamma}{\gamma+1} \cdot \frac{1}{MM_{CO_2}} \cdot R \cdot T_{desorción} \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (5)$$

Siendo:

- γ , el coeficiente adiabático (C_p/C_v) del CO_2 , estimado por interpolación en 1,3.
- η , el rendimiento de la compresión, estimado en un valor típico de eficiencias para estos procesos de 0,75.

Por tanto, sustituyendo en (5):

$$Q_{compresión} = \frac{1}{0,75} \cdot \frac{1,3}{1,3 + 1} \cdot \frac{1}{0,044 \frac{kg}{mol}} \cdot 8,314 \frac{J}{mol \cdot K} \cdot 298 K \cdot \left[\left(\frac{1}{0,3} \right)^{\frac{1,3-1}{1,3}} - 1 \right]$$

$$= 13,5 \frac{kJ}{kg_{CO_2}}$$

Demanda energética total

Finalmente, la demanda energética de calor total del proceso es el sumatorio de las anteriores, representado por la expresión (6).

$$Q_{total} = Q_{sensible} + Q_{reacción} + Q_{compresión} \quad (6)$$

Por tanto, sustituyendo los valores calculados previamente:

$$Q_{total} = (309,4 + 63,8) + 337,3 + 13,5 = 724 \frac{kJ}{kg_{CO_2}} = 0,724 \frac{MJ}{kg_{CO_2}}$$

Además, para facilitar el análisis de la viabilidad económica conviene calcular dicho valor en unidades de kWh. De esta forma:

$$Q_{total} = \frac{1.864 \frac{kJ}{kg_{CO_2}}}{3.600 s} = 0,201 \frac{kWh_t}{kg_{CO_2}}$$

La Figura 29 muestra un desglose de la demanda de calor que requieren los diferentes subprocesos o fases con respecto al proceso completo.

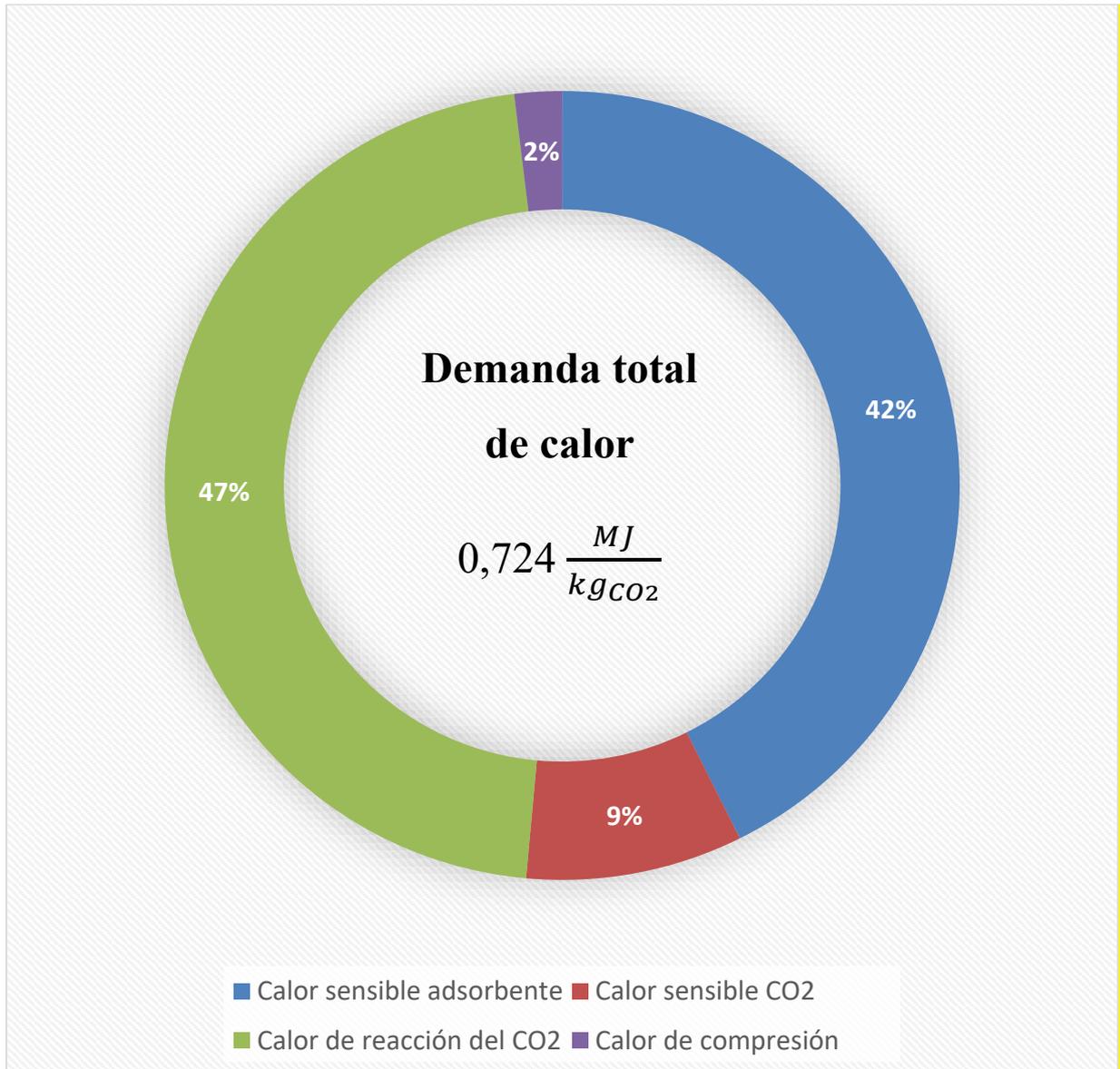


Figura 29: Demanda térmica de un módulo [Elaboración propia]

6.4.2 DEMANDA ELÉCTRICA

Debido a la falta de datos concretos y la necesidad de realizar un proceso experimental, se ha decidido estimar la demanda de energía eléctrica.

Como se ha mencionado anteriormente, en la Figura 28 se observa que, de forma general, la demanda eléctrica para tecnología S-DAC suele ser alrededor del 20-30%. Por lo tanto, conocida la demanda térmica se asume que es de un 80% y, por ello, la energía total requerida será:

$$Demanda\ energética\ total = \frac{Demanda\ térmica}{0,7} = \frac{0,724 \frac{MJ}{kg_{CO_2}}}{0,7} = 1,034 \frac{MJ}{kg_{CO_2}}$$

Expresado en kWh/kgCO₂:

$$Demanda\ energética\ total = \frac{1.034 \frac{kJ}{kg_{CO_2}}}{3.600\ s} = 0,287 \frac{kWh}{kg_{CO_2}}$$

Por tanto, la demanda eléctrica estimada es:

$$\begin{aligned} Demanda\ eléctrica &= 0,3 \cdot Demanda\ energética\ total = 0,3 \cdot 1,034 \frac{MJ}{kg_{CO_2}} \\ &= 0,31 \frac{MJ}{kg_{CO_2}} \end{aligned}$$

Expresado en kWh_e/kgCO₂:

$$Demanda\ eléctrica = \frac{310 \frac{kJ}{kg_{CO_2}}}{3.600\ s} = 0,086 \frac{kWh_e}{kg_{CO_2}}$$

6.4.3 DEMANDA ENERGÉTICA TOTAL

A modo de resumen:

Demanda de energía térmica				
Calor sensible adsorbente	309,4		$\frac{kJ}{kg_{CO_2}}$	
Calor sensible CO ₂	63,8		$\frac{kJ}{kg_{CO_2}}$	
Calor reacción CO ₂	337,3		$\frac{kJ}{kg_{CO_2}}$	
Calor compresión	13,5		$\frac{kJ}{kg_{CO_2}}$	
Demanda térmica total	0,724	$\frac{MJ}{kg_{CO_2}}$	0,201	$\frac{kWh_t}{kg_{CO_2}}$
Demanda de energía eléctrica				
Demanda eléctrica total	0,31	$\frac{MJ}{kg_{CO_2}}$	0,086	$\frac{kWh_e}{kg_{CO_2}}$
Demanda de energía total				
Demanda energética total	1,034	$\frac{MJ}{kg_{CO_2}}$	0,287	$\frac{kWh}{kg_{CO_2}}$

Tabla 11: Desglose de la demanda energética de un módulo [Elaboración propia]

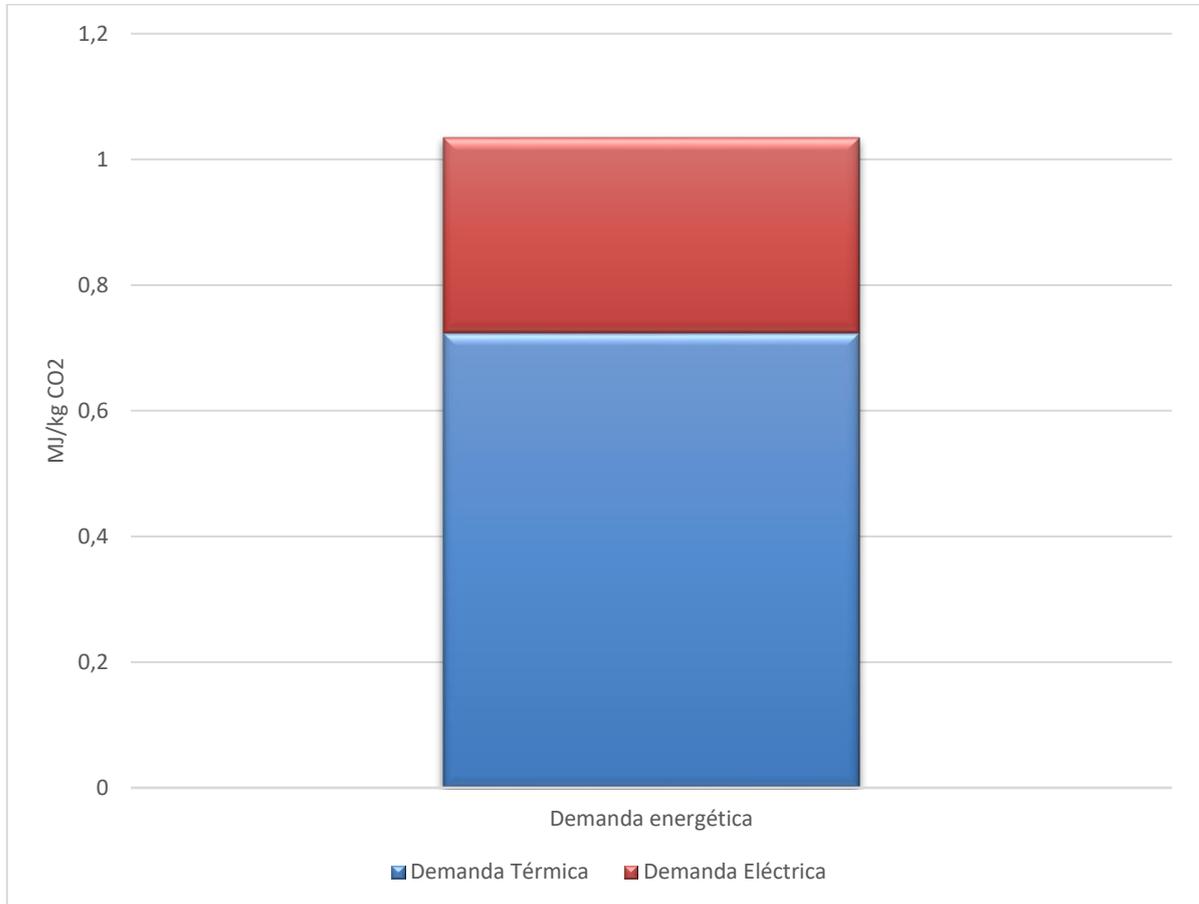


Figura 30: Demanda energética del proceso [Elaboración propia]

Por último, la estimación de 40 módulos por edificio conllevaría la siguiente demanda energética:

Demanda de energía térmica				
Demanda térmica total	28,96	$\frac{MJ}{kg_{CO_2}}$	8,04	$\frac{kWh_t}{kg_{CO_2}}$
Demanda de energía eléctrica				
Demanda eléctrica total	12,4	$\frac{MJ}{kg_{CO_2}}$	3,44	$\frac{kWh_e}{kg_{CO_2}}$
Demanda de energía total				
Demanda energética total	41,36	$\frac{MJ}{kg_{CO_2}}$	11,48	$\frac{kWh}{kg_{CO_2}}$

Tabla 12: Desglose de la demanda energética de 40 módulos [Elaboración propia]

6.5 APROVISIONAMIENTO ENERGÉTICO

Como se ha mencionado previamente, se trata de una tecnología de emisiones negativas de CO₂, no solo por el hecho de capturar CO₂ de fuentes no puntuales de emisiones sino también por la utilización de energía limpia de emisiones en el proceso de captura.

Por ello, el aprovisionamiento energético se llevará a cabo de las siguientes tecnologías:

Demanda térmica

Para el calentamiento del adsorbente (**100°C**) se procederá con una bomba de calor de alta temperatura. Dicha bomba aprovechará el calor residual del agua de condensación de los sistemas HVAC, que típicamente se encuentra en un rango de temperaturas de 30 a 40°C.

Se ha seleccionado la bomba de calor de la compañía Linuo Ritter, modelo DKFXRS-60II/FD. Las especificaciones técnicas de interés son las siguientes [40]:

- Temperatura de salida: hasta 120°C
- Potencia nominal: 60 kW
- COP: 2
- Coste: 25.000 €

Demanda eléctrica

Tanto para la demanda eléctrica calculada anteriormente como para la bomba de calor se estudiarán tres opciones de tecnologías renovables:

- Solar Fotovoltaica
- Eólica On-shore
- Eólica Off-shore

En resumen, en el siguiente apartado se estudiará la viabilidad económica de la tecnología para los siguientes casos:

Fuente de Calor	Fuente de Electricidad	
$8,04 \frac{kWh_t}{kgCO_2}$	$3,44 \frac{kWh_e}{kgCO_2}$	
Bomba de calor	Opción 1	Solar Fotovoltaica
	Opción 2	Eólica Onshore
	Opción 3	Eólica Offshore

Tabla 13: Fuentes para el aprovisionamiento energético [Elaboración propia]

Capítulo 7. ESTUDIO DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA

7.1 COSTE NIVELADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA

Para calcular el coste de captura de CO₂, en €/kg CO₂, se realizará siguiendo el modelo económico de coste nivelado de una tecnología. Para ello, se seguirá la expresión (7):

$$LCOD = \frac{CAPEX \cdot f_a + OPEX}{capacidad} + demanda_{t\acute{e}rmica} \cdot LCOH + demanda_{el\acute{e}ctrica} \cdot LCOE \quad (7)$$

Donde:

- f_a : es el factor de amortización y se emplea para distribuir de manera uniforme la amortización de una inversión a lo largo de toda la duración del proyecto. Su cálculo se lleva a cabo mediante la ecuación (8).

$$f_a = \frac{wacc \cdot (1+wacc)^N}{(1+wacc)^N - 1} \quad (8)$$

- WACC (*Weighted Average Cost of Capital*): es el tipo de interés al que una empresa obtiene financiamiento, o, en otras palabras, el rendimiento mínimo que un proyecto o inversión debe alcanzar para que la empresa decida invertir.
- N: Vida útil del proyecto, se ha estimado en 20 años.

7.1.1 LCOE (LEVELIZED COST OF ELECTRICITY)

Para el cálculo del LCOE, se procederá con la siguiente expresión:

$$LCOE = \frac{Coste_{inversión} \cdot f_a + Coste_{opymnto}}{Tiempo_{operación}} \quad (9)$$

Para ello, se ha recopilado la siguiente información y calculado los diferentes parámetros.

- Vida media

La vida útil de este tipo de tecnologías suele rondar entre los 25-30 años en el caso de la fotovoltaica y 20-25 años en el caso de la eólica. Por tanto:

Tecnología	
Solar Fotovoltaica	30 años
Eólica On-shore	25 años
Eólica Off-shore	25 años

Tabla 14: Vida útil de las diferentes renovables en España [41]

- WACC

Se ha asumido el mismo valor del WACC para las tres tecnologías con un valor general del **7,5%** (actualmente varía entre el 7 y 8%).

- Factor de amortización (f_a)

Sustituyendo en la ecuación (8) se obtiene:

Tecnología	
Solar Fotovoltaica	0,0847
Eólica On-shore	0,0897
Eólica Off-shore	0,0897

Tabla 15: Factores de amortización de renovables [Elaboración propia]

- Coste de inversión

Acorde al Word Energy Outlook 2023 de la IEA, convertido a euros:

Tecnología	
Solar Fotovoltaica	700 €/kW
Eólica On-shore	1150 €/kW
Eólica Off-shore	3120 €/kW

Tabla 16: Costes de inversión [42]

- Coste de operación y mantenimiento

Acorde al Word Energy Outlook 2023 de la IEA, convertido a euros:

Tecnología	
Solar Fotovoltaica	15 €/kW
Eólica On-shore	23 €/kW
Eólica Off-shore	100 €/kW

Tabla 17: Costes de operación y mantenimiento [42]

- Tiempo de operación

Hace referencia al tiempo mínimo anual de operación de la tecnología a plena potencia en España. Los valores se han obtenido de la publicación de la Orden TED/1161/2020 [43] y vienen representados en la Tabla 18.

Tecnología	
Solar Fotovoltaica	1.500 h
Eólica On-shore	2.200 h
Eólica Off-shore	3.500 h (estimación)

Tabla 18: Tiempo mínimo de operación a plena potencia de renovables en España [43], [44]

Por tanto, sustituyendo los diferentes valores en la expresión (9) se obtiene el valor del LCOE para cada caso:

Tecnología	LCOE
Solar Fotovoltaica	49,5 €/MWh_e
Eólica On-shore	57,3 €/MWh_e
Eólica Off-shore	108,5 €/MWh_e

7.1.2 LCOH (LEVELIZED COST OF HEATING)

Para el cálculo del LCOH se procederá mediante la siguiente expresión:

$$LCOH = \frac{Coste_{bomba} \cdot f_a + Coste_{mntno} \cdot f_a \cdot f_E^M}{Energía_{suministrada}} + \frac{LCOE}{COP_{bomba}} \quad (10)$$

Donde:

- Para un WACC estimado de **7,5%** [45] y una vida útil (N) de **20** años, se obtiene el siguiente valor del factor de amortización:

$$f_a = \frac{0,075 \cdot (1 + 0,075)^{20}}{(1 + 0,075)^{20} - 1} = \mathbf{0,098}$$

- El coste de la bomba de calor (CAPEX) es de **25.000 €**.
- La energía anual total de calor suministrada es de:

$$21 \frac{kWh_t}{kg_{CO_2}} \cdot 40.000 \text{ kg}_{CO_2} \text{ capturados} = \mathbf{840 MWh_t}$$

- El coste anual de **mantenimiento** se estima en **500 €**.
- f_E^M : Es el factor de acumulación (del mantenimiento en este caso), que reúne a lo largo de la vida del proyecto el valor futuro anual de un flujo inicial, ajustándolo al valor presente mediante un descuento. Se halla mediante la siguiente expresión:

$$f_E^M = \frac{k_M \cdot (1 - k_M^N)}{1 - k_M} \quad (11)$$

- Donde k_M se obtiene de la siguiente fórmula:

$$k_M = \frac{1+r}{1+wacc} \quad (12)$$

- Siendo r la tasa a la que se proyecta que aumentarán los costos, en este caso, específicamente los costos de mantenimiento. Para este proyecto, se ha estimado un crecimiento anual del **5%**.

Por tanto, sustituyendo valores en las ecuaciones (11) y (12) se obtiene:

- $k_M = 0,98$
 - $f_E^M = 16,3$
- El **COP** de la bomba de calor es de **2**.
 - En el apartado previo, se han obtenido los siguientes valores del LCOE:
 - $LCOE_{\text{Solar Fotovoltaica}}: 49,5 \text{ €/MWh}_e$
 - $LCOE_{\text{Eólica On-shore}}: 57,3 \text{ €/MWh}_e$
 - $LCOE_{\text{Eólica On-shore}}: 108,5 \text{ €/MWh}_e$

Finalmente, se obtienen los valores del LCOH que aparecen en la Tabla 19.

LCOH		
Solar Fotovoltaica	Eólica On-shore	Eólica off-shore
28,6 €/MWh_t	32,5 €/MWh_t	58,1 €/MWh_t

Tabla 19: LCOH del proyecto [Elaboración propia]

7.1.3 LCOD (LEVELIZED COST OF DAC)

Una vez obtenidos el LCOH y el LCOE (Tabla 20) y, conocidas las demandas energéticas del proyecto (Tabla 21), se va a proceder con el resto de los parámetros.

Tecnología	LCOE	LCOH (Bomba de calor)
Solar Fotovoltaica	49,5 €/MWh _e	28,6 €/MWh _t
Eólica On-shore	57,3 €/MWh _e	32,5 €/MWh _t
Eólica Off-shore	108,5 €/MWh _e	58,1 €/MWh _t

Tabla 20: LCOE y LCOH [Elaboración propia]

Demanda Térmica	Demanda Eléctrica
8,04 $\frac{MWh_t}{tonCO_2}$	3,44 $\frac{MWh_e}{tonCO_2}$

Tabla 21: Demanda energética [Elaboración propia]

- Para un WACC estimado de 7% [41] y una vida media estimada del proyecto de 20 años (N), sustituyendo en la ecuación (8) se obtiene el factor de amortización:

$$f_a = \frac{0,07 \cdot (1 + 0,07)^{20}}{(1 + 0,07)^{20} - 1} = \mathbf{0,094}$$

- Capacidad

Tal y como se ha mencionado en el apartado de viabilidad técnica, la capacidad de captura estimada para un proyecto de 40 módulos es de **40 toneladas de CO₂**.

- CAPEX

Para estimar el coste de inversión de la tecnología se tendrán en cuenta los siguientes componentes:

- Adsorbente

$$2,75 \frac{\text{kg}_{\text{adsorbente}}}{\text{módulo}} \cdot 40 \text{ módulos} \cdot 45 \frac{\text{€}}{100 \text{ g}_{\text{adsorbente}}} = 49.500 \text{ €}$$

- Bomba de vacío: **850 €**
- Contenedor temporal de CO₂: **10.000 €**

El **CAPEX** del proyecto asciende aproximadamente a **60.350 €**

- OPEX

Los gastos de operación y mantenimiento anuales se asumen en un **3%** del CAPEX, es decir, en **1.810,5 €**.

Por tanto, finalmente, sustituyendo dichos valores en la expresión (7) se obtiene el valor del LCOD para cada caso.

LCOD		
Solar Fotovoltaica + Bomba de calor	Eólica On-shore + Bomba de calor	Eólica off-shore + Bomba de calor
587,3 €/ton. CO ₂	645,5 €/ton.CO ₂	1.027,5 €/ton.CO ₂

Tabla 22: LCOD para cada caso estudiado [Elaboración propia]



Figura 31: LCOD para cada caso [Elaboración propia]

A continuación, se muestra un desglose de los parámetros que afectan al LCOD calculado en cada caso.

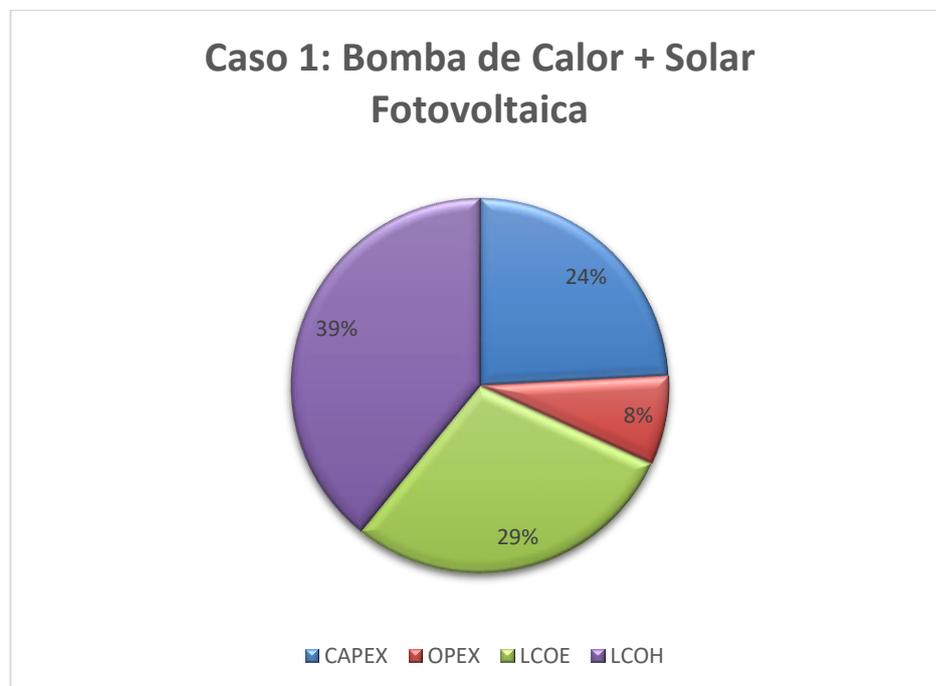


Figura 32: Desglose del LCOD para el caso de bomba de calor + solar fotovoltaica [Elaboración propia]

Caso 2: Bomba de Calor + Eólica On-shore

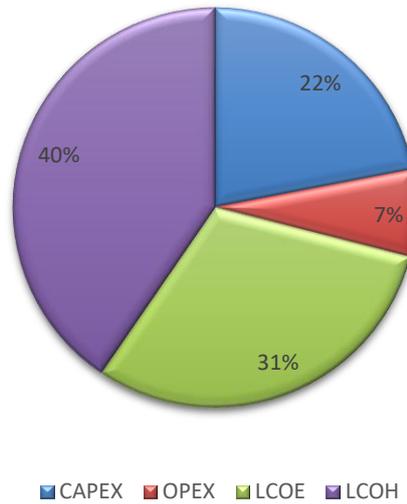


Figura 33: Desglose del LCOD para el caso de bomba de calor + eólica on-shore [Elaboración propia]

Caso 3: Bomba de Calor + Eólica Off-shore

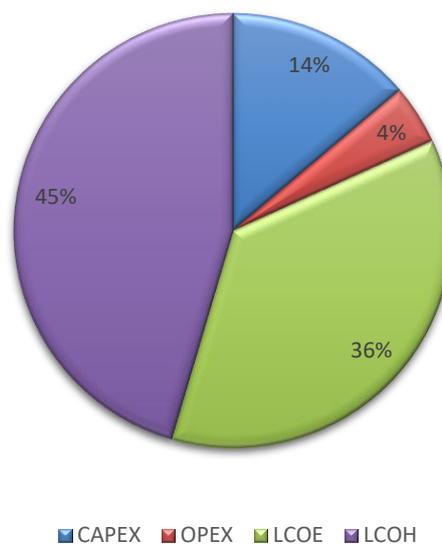


Figura 34: Desglose del LCOD para el caso de bomba de calor + eólica off-shore [Elaboración propia]

7.2 HORIZONTE 2030-2050

En el horizonte 2030-2050, se espera una notable reducción de los costes asociados con las tecnologías DAC, lo que podría posicionarlas como una herramienta clave en las estrategias globales para mitigar el cambio climático. Este descenso en los costes se debe a una combinación de factores, incluyendo avances tecnológicos, economías de escala, y un mayor aprendizaje en la implementación de estas tecnologías a gran escala. A medida que las DAC se comercialicen en la década de 2020 y se expandan significativamente en las décadas siguientes, se anticipa que sus costos operativos y de capital disminuirán, haciéndolas cada vez más competitivas frente a otras tecnologías de captura de carbono.

En lo referente al **LCOE**, acorde al informe “*World Energy Outlook 2023*” de la IEA [42], se espera una reducción de este para las tres tecnologías renovables estudiadas. A continuación, se observan dichas reducciones en los costes.

	Inversión Tecnología [€/kW]			Operación y mantenimiento Tecnología [€/kW]			Tiempo de operación [h]			LCOE recalculado [€/MWh _e]		
	Act.	2030	2050	Act.	2030	2050	Act.	2030	2050	Act	2030	2050
Solar Fotovoltaica	700	650	450	15	12	10	1.500	1.600	1.800	49,5	44,7	26,7
Eólica On-shore	1.150	1.100	1.040	23	15	15	2.200	2.300	2.500	57,3	50	45,5
Eólica Off-shore	3.120	1.800	1.500	100	30	15	3.500	4.000	4.300	108,5	47,9	34,8

Tabla 23: LCOE recalculado en el horizonte 2030-2050 [Elaboración propia]

Para el caso del **LCOH**, al haber seleccionado una bomba en concreto, asumimos que el coste de inversión de las bombas de calor de alta temperatura, van a sufrir una reducción en su CAPEX genérico [46]. Además, el otro factor influyente es el nuevo valor del LCOE para cada caso.

	Inversión Bomba			LCOE recalculado			LCOH recalculado		
	[€]			[€/MWh _e]			[€/MWh _t]		
	Act.	2030	2050	Act	2030	2050	Act.	2030	2050
Solar Fotovoltaica	25.000	17.500	12.500	49,5	44,7	26,7	28,6	25	15,3
Eólica On-shore				57,3	50	45,5	32,5	27,7	24,5
Eólica Off-shore				108,5	47,9	34,8	58,1	26,7	19,3

Tabla 24: LCOH recalculado en el horizonte 2030-2050 [Elaboración propia]

Por último, en lo respectivo al **LCOD**, se estima que el coste de inversión (por diversos factores mencionados en el primer párrafo del documento) se reducirá un 40% en 2030 frente a la actualidad y un 50% en 2050 frente a la década anterior [41]. En cuanto al OPEX, éste se mantendrá constante en un 3% respecto al CAPEX de la década correspondiente [41]. Además, se espera una mejor en la capacidad de captura, con relación a los avances tecnológicos e incremento de la madurez de la tecnología, estimada en 80 toneladas por edificio en 2030 y 130 toneladas capturadas anualmente en 2050.

En la Tabla 25 se pueden observar los nuevos valores calculados del LCOD para el horizonte 2030-2050.

	Inversión DAC			Operación y mantenimiento DAC			LCOE recalculado			LCOH recalculado			LCOD recalculado		
	[€]			[€]			[€/MWh _e]			[€/MWh _t]			[€/ton. CO ₂]		
	Act.	2030	Act	Act	Act	2050	Act.	2030	2050	Act	2030	2050	Act	2030	2050
Solar Fotovoltaica							49,5	44,7	26,7	28,6	25	15,3	587,3	411	232
Eólica On-shore	60.350	36.210	18.105	1.810,5	1.086,3	543	57,3	50	45,5	32,5	27,7	24,5	645,5	451	371
Eólica Off-shore							108,5	47,9	34,8	58,1	26,7	19,3	1.027,5	436	292

Tabla 25: LCOD recalculado en el horizonte 2030-2050 [Elaboración propia]

7.3 ANÁLISIS FINANCIERO

A continuación, se va a llevar a cabo en estudio financiero de un proyecto tipo con las siguientes suposiciones:

- Debido al menor coste, se ha seleccionado el caso de aprovisionamiento energético con bomba de calor y solar fotovoltaica.
- Edificio comercial de oficinas que dispone de:
 - Sistema BMS para la monitorización y control de la ventilación acorde a los niveles de CO₂, de forma que, con una ventilación a demanda, se generará un ahorro energético en el sistema HVAC del edificio.
 - Una superficie estándar de 5.000 m².
 - Bomba de calor ya instalada en el edificio.
- Coste de la energía constante en todo el período.

7.3.1 GASTOS

CAPEX

La inversión inicial de proyecto ya se calculó previamente y es de 60.350 €.

OPEX

Los gastos de operación y mantenimiento anuales se han estimado en un 2% del CAPEX del proyecto, es decir, 1.207 €.

ENERGÍA

En lo referente al gasto energético, según lo estipulado en la última subasta de energías renovables en España, que tuvo lugar el 22 de noviembre de 2022, el precio medio ponderado asignado para la energía fotovoltaica fue de 42,78 €/MWh [47]. Sin embargo, es importante señalar que este coste ha aumentado en comparación con la subasta de 2021, donde fue de 25 €/MWh [48]. Este incremento se debe principalmente a que el contexto de la guerra en

Ucrania ha tenido un impacto significativo en las ofertas presentadas por los participantes. Por lo tanto, desde un punto de vista optimista, se ha decidido optar por el precio de la subasta de 2021, derivando en 11.480 € anuales.

7.3.2 INGRESOS

SUBVENCIÓN INNOVATION FUND

El fondo europeo “*Innovation Fund*” cuenta con, aproximadamente, 40 mil millones de euros para subvencionar proyectos sostenibles, alineados con el escenario de alcanzar las cero emisiones netas en 2050.

Por tanto, se va a suponer que se dispone de esta subvención la cual cubre el 60% de la inversión inicial del proyecto y de los costes operativos (OPEX) de los 10 primeros años, derivando en 43.452€ que se cobrarán en el presente o “año 0”.

VENTA DE CRÉDITOS DE EMISIONES DE CO₂

Al tratarse de una tecnología de emisiones negativas, es posible generar ingresos mediante la venta de permisos de emisiones de CO₂ dentro de mercado secundario del Mercado Europeo de Emisiones EU ETS. Para la estimación de los precios de ahora a 20 años se ha analizado un estudio llevado a cabo por *Enerdata* acerca de la evolución del precio del carbono en los próximos años (Figura 35 y Figura 36).

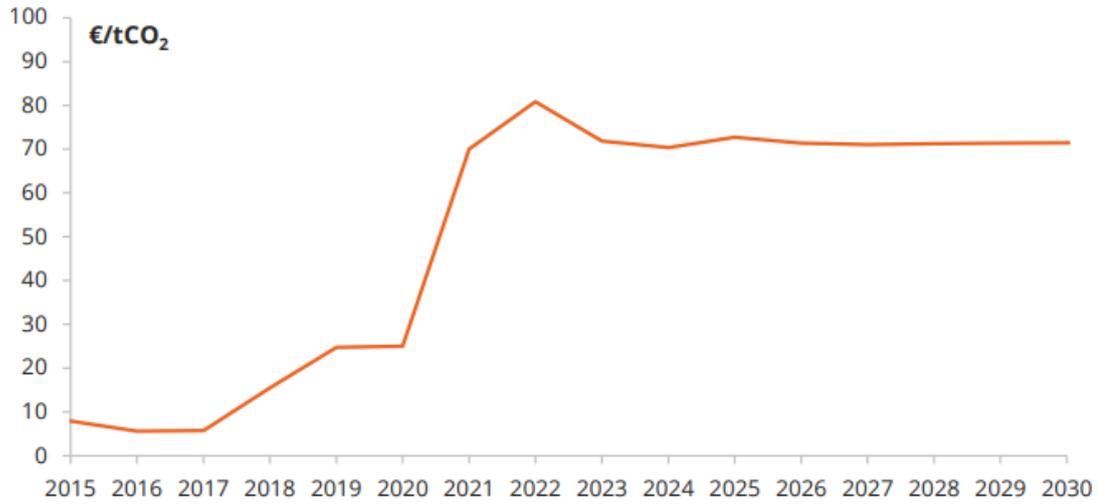


Figura 35: Evolución del precio del carbono en el EU ETS en el horizonte 2030 [49]

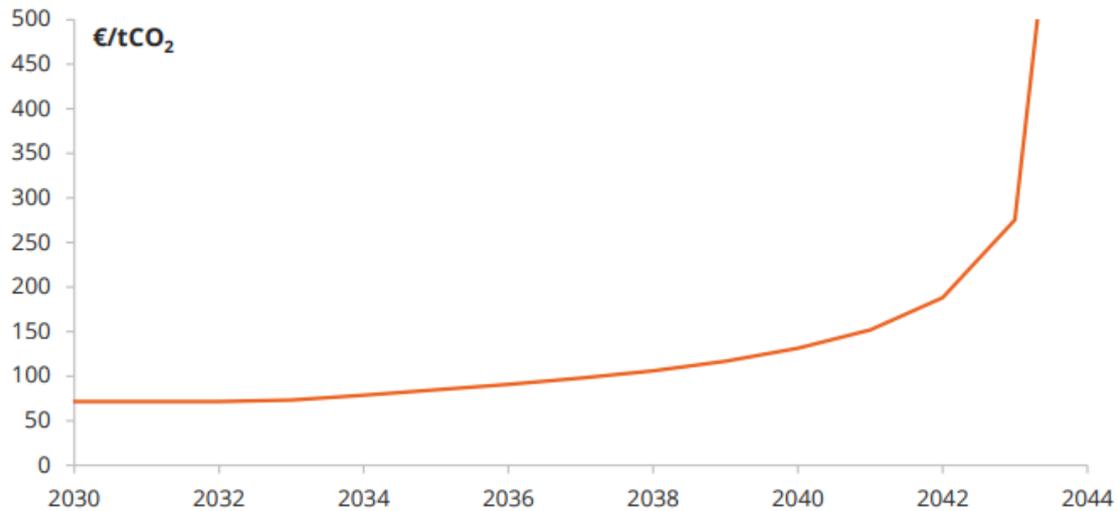


Figura 36: Evolución del precio del carbono en el EU ETS en el horizonte 2030-2045 [49]

Por tanto, se ha estimado la siguiente evolución de precios en el período que abarca el análisis financiero:

Venta de CO2	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044
[€/ton CO2]	77	78	75	75	75	75	80,5	86	91,5	97	102,5	108	113,5	119	124,5	130	170	200	280	500
[€]	3080	3120	3000	3000	3000	3000	3220	3440	3660	3880	4100	4320	4540	4760	4980	5200	6800	8000	11200	20000

Tabla 26: Evolución del precio de venta de derechos de emisiones de CO₂ [Elaboración propia]

AHORRO ENERGÉTICO EN EL SISTEMA HVAC

La implementación del control de la ventilación por demanda puede llegar a generar un ahorro energético en el sistema HVAC del 38% [50], el cual puede alcanzar un consumo anual de 50kWh/m².

Por tanto, para el edificio de estudio estándar de 5.000 m² y un precio medio de la electricidad en España de 0,107 €/kWh [51] se ha calculado un ahorro anual en los costes de 10.200 €.

7.3.3 FLUJO DE CAJA

PERÍODO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
Ahorro energético del HVAC		10.200,00 €	10.200,00 €	10.200,00 €	10.200,00 €	10.200,00 €	10.200,00 €	10.200,00 €	10.200,00 €	10.200,00 €	10.200,00 €	10.200,00 €	10.200,00 €	10.200,00 €	10.200,00 €	10.200,00 €	10.200,00 €	10.200,00 €	10.200,00 €	10.200,00 €	10.200,00 €	10.200,00 €	
Subvención (Innovation Fund)	43.452,00 €																						
Venta de créditos de CO2		3.080,00 €	3.120,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.000,00 €	3.220,00 €	3.440,00 €	3.660,00 €	3.880,00 €	4.100,00 €	4.320,00 €	4.540,00 €	4.760,00 €	4.980,00 €	5.200,00 €	6.800,00 €	8.000,00 €	11.200,00 €	20.000,00 €		
CAPEX	(60.350,00) €																						
OPEX		(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €	(1.207,00) €
ENERGÍA		(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €	(11.480,00) €
CASH FLOW	(16.898,00) €	593,00 €	633,00 €	513,00 €	513,00 €	513,00 €	513,00 €	733,00 €	953,00 €	1.173,00 €	1.393,00 €	1.613,00 €	1.833,00 €	2.053,00 €	2.273,00 €	2.493,00 €	2.713,00 €	4.313,00 €	5.513,00 €	8.713,00 €	17.513,00 €		
CASH FLOW ACUMULADO	(16.898,00) €	(16.305,00) €	(15.672,00) €	(15.159,00) €	(14.646,00) €	(14.133,00) €	(13.620,00) €	(12.887,00) €	(11.934,00) €	(10.761,00) €	(9.368,00) €	(7.755,00) €	(5.922,00) €	(3.869,00) €	(1.596,00) €	897,00 €	3.610,00 €	7.923,00 €	13.436,00 €	22.149,00 €	39.662,00 €		

Figura 37: Estudio Financiero [Elaboración Propia]

7.3.4 RESULTADOS

Una vez llevado a cabo el flujo de caja del proyecto, se han calculado los siguientes parámetros que indican la rentabilidad del proyecto.

RESULTADOS	
VAN	672,92 €
TIR	8,30%
PAYBACK PERIOD	14,64 años
ROI	235%

Tabla 27: Indicadores de rentabilidad [Elaboración propia]

El período de recuperación de la inversión o **Payback Period** se deduce directamente de la Figura 37. Se observa como a partir del año 14 los flujos de caja acumulados pasan a ser positivos, es decir, excederían el valor de la inversión inicial al cabo de 14 años. De todas formas, se calculó de forma exacta dicho indicador obteniendo una cifra de **14,64 años**.

Por tanto, atendiendo al Payback Period y a los flujos de caja, se deduce que el proyecto puede llegar a ser rentable a largo plazo.

El **Valor Actual Neto (VAN)** para una tasa de descuento del 8%, acorde al tipo de interés actual del 4%, es positivo, lo que indica que el proyecto generará un valor adicional después de cubrir la inversión inicial y los costes operativos. Sin embargo, el valor de **672,92 €** es relativamente modesto, lo que implica que, aunque el proyecto es viable, no es altamente rentable en términos absolutos.

La **Tasa Interna de Retorno (TIR)**, que indica la tasa de rentabilidad que se espera del proyecto, es de **8,3%**. Es razonablemente atractiva, aunque no extremadamente alta, lo que sugiere un retorno moderado sobre la inversión.

El **Retorno sobre la Inversión (ROI)** de **235%** es notablemente alto y sugiere que el proyecto generará más del doble de la inversión inicial en términos de retorno acumulado. Es importante destacar que este ROI tan elevado está significativamente influenciado por la

subvención del *Innovation Fund*, que cubre una parte considerable de los costos iniciales, reduciendo el capital necesario y aumentando proporcionalmente los retornos.

Por lo tanto, los resultados financieros muestran que el proyecto es viable, con un VAN positivo, una TIR razonablemente atractiva y un ROI excepcionalmente alto. El ROI elevado sugiere una fuerte rentabilidad, aunque altamente amplificada por la subvención recibida, que reduce la carga financiera inicial. Sin la subvención, tanto el ROI como el VAN y el TIR podrían ser considerablemente inferiores, resaltando la importancia de los apoyos financieros para la viabilidad económica del proyecto.

Capítulo 8. ESTUDIO DE LA VIABILIDAD

REGULATORIA - MEDIOAMBIENTAL

Una vez analizada la viabilidad técnica y económica de la tecnología, en este capítulo se va a analizar la alineación de esta tecnología con la regulación ambiental más reciente en el entorno del sector inmobiliario de la Unión Europea, concretamente, la Taxonomía Europea y la Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios (EPBD).

La principal razón de realizar la alineación desde el punto de vista de los sectores inmobiliario y de la construcción es que dichos sectores representan el 40% del consumo energético y el 36% de las emisiones de CO₂ en Europa [52] y, por tanto, son sectores potenciales para la adopción de la tecnología que abarca el proyecto.

8.1 TAXONOMÍA EUROPEA

Como se ha mencionado en el Capítulo 1. , la Taxonomía Europea o Reglamento (UE) 2020/852 es un marco regulatorio que pretende guiar la inversión privada hacia actividades que contribuyan a los últimos objetivos medioambientales y climáticos acordados en el Pacto Verde Europeo, alrededor del objetivo principal de neutralidad de carbono en 2050 [53].

Este marco establece seis objetivos medioambientales clave, alrededor de los cuales se deberán establecer un sistema de clasificación de las actividades económicas. Dichos objetivos son:

- 1) Mitigación del cambio climático

Ayudar a estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero, evitándolas o reduciéndolas.

2) Adaptación al cambio climático

Disminuir o evitar los efectos adversos actuales y futuros del cambio climático, así como los riesgos asociados.

3) Uso Sostenible y Protección de los Recursos Hídricos y Marinos

Conservar y mantener la calidad del agua y proteger los océanos.

4) Transición a una Economía Circular

Mejorar la durabilidad, capacidad de reparación y reutilización de los productos.

5) Prevención y Control de la Contaminación

Disminuir las emisiones de contaminantes y mejorar la calidad del aire, agua y suelo.

6) Protección y Restauración de la Biodiversidad y los Ecosistemas

Proteger y fortalecer la salud de los ecosistemas y la diversidad biológica.

El reglamento establece que para que una actividad sea sostenible y, por lo tanto, entre dentro del marco de actividades elegibles por la Taxonomía (“*Taxonomy-Aligned*”); ésta debe de:

- Contribuir sustancialmente a, mínimo, uno de los seis objetivos medioambientales establecidos por el reglamento.
- No originar daños significativos al resto de los objetivos.
- Cumplir las garantías sociales mínimas cuando se desarrolle la actividad, es decir, conforme con:
 - Las Líneas Directrices de la OCDE para Empresas Multinacionales y los Principios Rectores de las Naciones Unidas sobre Empresas y Derechos Humanos, haciendo énfasis en la Declaración de Principios y Derechos

Fundamentales en el Trabajo de la Organización Internacional del Trabajo (OIT).

- Los Ocho Convenios fundamentales de la OIT: libertad sindical, derecho de sindicación, trabajo forzoso, abolición del trabajo forzoso, edad mínima, prohibición de las peores formas de trabajo infantil, igualdad de remuneración, discriminación [54].
- La Carta Internacional de Derechos Humanos.

Dentro del marco de actividades elegibles, la Taxonomía Europea establece un sistema de clasificación según la actividad económica en cuestión pertenezca a los tres grupos siguientes:

1) Actividades Bajas en Carbono

Hacen referencia a aquellas actividades que no generan emisiones, emiten cantidades muy reducidas de CO₂ o, directamente, se tratan de tecnología de captura de CO₂.

Ejemplo: empleo de energía fotovoltaica, tecnologías CDR.

2) Actividades de Transición

Se refieren a aquellas actividades para las que no existe una alternativa tecnológica o económicamente viable con bajas emisiones de CO₂, pero que apoyan la transición hacia una economía climáticamente neutra mediante la reducción progresiva de emisiones.

Ejemplo: renovación de edificios; producción de un cemento con emisiones reducidas de CO₂.

3) Actividades Facilitadoras

Esta clase de actividades permiten que otras puedan realizar una contribución significativa a uno o varios objetivos medioambientales, sin perjudicar dichos objetivos en sí mismas.

Ejemplo: fabricación de componentes para tecnologías de generación de energía renovable.

Por último, en lo referente al ámbito de aplicación del reglamento, cabe mencionar que, en el año presente solo están sujetas a la Taxonomía aquellas grandes compañías de interés público con más de 500 trabajadores a su cargo, es decir, aquellas sujetas al alcance de la Directiva de Informes No Financieros (NFRD por sus siglas en inglés: *Non-Financial Reporting Directive*). Sin embargo, este ámbito se expandirá en 2025 para aquellas empresas (incluyendo PYMES cotizadas) que cumplan, como mínimo, con dos de los criterios que se mencionan a continuación y que, por lo tanto, deben reportar sus informes bajo la Directiva sobre información corporativa en materia de sostenibilidad (CSRD, por sus siglas en inglés *Corporate Sustainability Reporting Directive*), que sustituye la normativa de la directiva anterior.

- Plantilla superior a 250 empleados.
- Facturación superior a 40 millones de euros.
- Balance superior a 20 millones de euros.

Una vez comprendido el funcionamiento de la Taxonomía Europea se procede a explicar cómo se alinea integración de la S-DAC en edificios con este reglamento, desde el punto de vista de una compañía desarrolladora de la tecnología que abarca el proyecto.

De un primer vistazo, se observa que claramente la implementación de la tecnología S-DAC en edificios se encuentra dentro del primer grupo de actividades elegibles por la Taxonomía: Actividades Bajas en Carbono. De hecho, al ser una tecnología de captura de CO₂ que no es llevada a cabo en fuentes emisoras puntuales de dicho gas, sino que lo captura directamente del aire; se encuentra dentro del grupo de tecnologías de emisiones “**negativas**” de CO₂; por lo que da un paso más para alcanzar la neutralidad climática.

A continuación, se va a proceder con la alineación de esta tecnología con la Taxonomía desde el punto de vista de una empresa cuya actividad económica principal corresponda, concretamente, con la integración de la S-DAC en sistemas HVAC de edificios.

Para ello, se seguirán los siguientes pasos:

1) Comprobación de la elegibilidad de la actividad económica

Primeramente, se debe obtener el y/o los códigos NACE (Nomenclatura estadística de actividades económicas de la Comunidad Europea) que engloban a esta tecnología, según el Reglamento (CE) 1893/2006. Se han identificado los dos siguientes [55]:

- 71 - Servicios técnicos de arquitectura e ingeniería; ensayos y análisis técnicos

71.12 Servicios técnicos de ingeniería y otras actividades relacionadas con el asesoramiento técnico

- 72 – Investigación y desarrollo

72.19 Otra investigación y desarrollo experimental en ciencias naturales y técnicas

A continuación, se debe verificar si dichos códigos de las actividades se encuentran dentro de una o más categorías elegibles dentro de la Taxonomía, acorde al Reglamento (UE) 2020/852. Se han identificado dos categorías altamente relacionadas con la tecnología del proyecto que engloban las actividades anteriores [53]:

- **Investigación, desarrollo e innovación para la captura aérea directa de CO₂**
- **Servicios profesionales relacionados con la eficiencia energética de los edificios**

Por tanto, se concluye que el desarrollo de esta tecnología resulta una actividad elegible dentro del marco de la Taxonomía, concretamente, como Actividad Baja en Carbono como se ha mencionado previamente.

2) Evaluación de la contribución sustancial a uno o varios de los objetivos medioambientales

Una vez conocidas las dos categorías que engloban a la tecnología en cuestión, se observa que, atendiendo a lo establecido en el Reglamento (UE) 2020/852, conllevan una contribución sustancial al primer objetivo medioambiental: Mitigación del Cambio Climático (MCC).

La contribución de esta actividad al objetivo MCC se considera sustancial ya que, acorde al Artículo 10 del mismo reglamento, se trata de una actividad que contribuye a estabilizar las concentraciones de GEI en la atmósfera mediante:

- La utilización de tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂
- La mejora de la eficiencia energética

3) Evaluación del principio de no causar perjuicio significativo al resto de objetivos medioambientales (DNSH por sus siglas en inglés: *Do No Significant Harm*)

En concordancia con los criterios reflejado en la Taxonomía acerca del principio DNSH (Artículo 17), a priori, sin necesidad de datos específicos de potenciales impactos en los diferentes objetivos medioambientales, se puede concluir que ambas categorías que pueden englobar la tecnología no producen ningún daño sustancial al resto de objetivos o, directamente, no aplica a alguno de ellos.

4) Evaluación del criterio de garantías sociales mínimas

Al tratarse de una actividad regulada por la Unión Europea, el cumplimiento de las garantías sociales mínimas se da por validado de forma automática sin necesidad de justificaciones adicionales.

A continuación, se muestra un resumen de la alineación con la Taxonomía.

NACE	Categoría dentro de la Taxonomía	Contribución Sustancial	Principio de No Perjuicio Significativo (DNSH)					Garantías Sociales Mínimas
		MCC	ACC	Agua	Economía Circular	Contaminación	Biodiversidad	
71.12 - Servicios técnicos de ingeniería y otras actividades relacionadas con el asesoramiento técnico	Servicios profesionales relacionados con la eficiencia energética de los edificios	✓	✓	N/A	N/A	✓	N/A	✓
72.19 - Otra investigación y desarrollo experimental en ciencias naturales y técnicas	Investigación, desarrollo e innovación para la captura aérea directa de CO2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla 28: Alineación con la Taxonomía Europea [Elaboración Propia]

Por lo tanto, la tecnología que se investiga en el proyecto, en caso de ser llevada a cabo por una empresa, correspondería con una actividad económica claramente alineada con la Taxonomía.

Por último, como se ha mencionado previamente, la mayor parte de compañías deberán divulgar su alineación con la Taxonomía a partir de 2025 y, para ello, existen una serie de indicadores clave de rendimiento (KPIs por sus siglas en inglés: *Key Performance Indicators*) que ayudan a definir y evaluar dicha alineación:

- **Facturación (*Turnover*)**
Porcentaje de las ventas de la compañía que provienen de actividades alineadas con la Taxonomía.
- **Gastos de Capital (*CapEx*)**
Proporción del gasto de capital que contribuye a la sostenibilidad de la compañía.
- **Gastos Operativos (*OpEx*)**
Proporción de los gastos operativos asociados a actividades alineadas con la Taxonomía.

8.2 DIRECTIVA EPBD

La nueva directiva europea de Eficiencia Energética de los Edificios (EPBD, por sus siglas en inglés: *Energy Performance Building Directive*), Directiva (UE) 2024/1275, establece un marco regulatorio para mejorar el rendimiento energético de los edificios [56]. Publicada recientemente, el 8 de mayo en el Diario Oficial de la UE, esta directiva actualiza y refuerza los compromisos europeos hacia la eficiencia energética en edificios y la reducción de sus emisiones de GEI. La aplicación de esta directiva en el sector de la construcción e inmobiliario se debe a que, como se ha mencionado previamente, los edificios representan un 40% del consumo energético y un 36% de las emisiones de GEI emitidas en la UE [57].

La EPBD obliga a todos los Estados Miembros a incorporar sus disposiciones en la legislación nacional en un período máximo de 24 meses, es decir, hasta marzo de 2026. En lo referente al plazo de aplicación en España, la transposición de la directiva en el ordenamiento español se llevará a cabo mediante la modificación del Código Técnico de la Edificación (CTE) y el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE), previsto para 2024. En línea con lo anterior, la Figura 38 representa los principales hitos temporales recogidos en la directiva.



Figura 38: Principales Hitos Temporales de la EPBD [58]

A continuación, se resume con un mayor detalle los hitos establecidos por la directiva.

- **2026**
 - Incorporación de la directiva a la normativa nacional correspondiente.
 - Los nuevos edificios ocupados o gestionados por la autoridad pública deben ser edificios de cero emisiones (ZEB por sus siglas en inglés, *Zero-Emission Buildings*).
 - Obligación de obtener un Pasaporte de Renovación de Edificios.
- **2027**
 - Deben alcanzar la clase de eficiencia energética E:
 - Todos los edificios no residenciales.
 - Todos los edificios cuyos propietarios u ocupadores sean organismos públicos.
- **2028**
 - Todos los edificios nuevos (privados) deben ser ZEBs.
- **2030**
 - Deben alcanzar la clase de eficiencia energética D:
 - Todos los edificios no residenciales
 - Todos los edificios cuyos propietarios u ocupadores sean organismos públicos.
 - Todos los edificios residenciales deben alcanzar la clase de eficiencia energética E.
 - Obligación de aprovisionamiento energético renovable (fotovoltaica o solar térmica) en edificios residenciales nuevos.
 - Obligación de reportar el cálculo de emisiones en todo el ciclo de vida de todos los edificios, es decir, el Potencial de Calentamiento Global (GWP) del edificio.
- **2050**
 - Todos los edificios, nuevos y existentes, deberán ser ZEB; alcanzando de esta forma un parque inmobiliario completamente descarbonizado.

La calificación energética se presenta mediante diversos indicadores que explican las causas del rendimiento energético, tanto bueno como malo, del edificio. Además, proporciona información valiosa sobre los aspectos a considerar al formular recomendaciones para mejorar dicho rendimiento. Los indicadores principales son las emisiones anuales de CO₂ y el consumo anual de energía primaria no renovable del edificio.

Para edificios cuyo uso no está destinado a la vivienda, la escala de calificación energética se representa en la Tabla 29; siendo *C* el cociente entre valor del indicador para el edificio a certificar y el valor del indicador para el edificio de referencia [59].

Calificación		Índice	
A		<i>C</i>	< 0,40
B	0,40	≤ <i>C</i>	< 0,65
C	0,65	≤ <i>C</i>	< 1,00
D	1,00	≤ <i>C</i>	< 1,30
E	1,30	≤ <i>C</i>	< 1,60
F	1,60	≤ <i>C</i>	< 2,00
G	2,00	≤ <i>C</i>	

Tabla 29: Calificación energética e índices para edificios de uso distinto al residencial privado [59]

En este contexto, integrar la tecnología DAC en los sistemas HVAC de edificios es una estrategia capaz de contribuir significativamente a los objetivos e hitos de la EPBD y de alcanzar las certificaciones objetivo de eficiencia energética en edificios. Concretamente, se han detectado cinco objetivos de la EPBD que se alinean perfectamente con la implementación de la tecnología que aborda este proyecto:

1) Reducción de emisiones de GEI

El fin último de la tecnología DAC en sí misma es reducir las emisiones por lo que resulta obvio la alineación con este objetivo. Adicionalmente, al impulsar su aprovisionamiento energético mediante energía renovable (cero emisiones) y

capturar el CO₂ del propio aire ambiente, se estarían emitiendo “emisiones negativas”.

2) Eficiencia energética en edificios

Esta tecnología es capaz de reducir la carga del sistema HVAC del edificio al controlar el tiempo de funcionamiento de la ventilación en función de los niveles de CO₂, lo que conlleva un uso más eficiente de la energía en el edificio.

3) Descarbonización del parque inmobiliario

Debido a que se captura CO₂ directamente del aire y se lleva a cabo la integración con sistemas de energía renovable, se facilita la transición hacia edificios de cero emisiones operativas (ZEB), de cara a lograr este objetivo en 2050.

4) Renovación energética

La implementación de esta tecnología en edificios es ideal para incorporarse en proyectos de renovación energética profunda gracias, en gran parte, a su capacidad modular y fácil integración; alineándose con la estrategia "Oleada de Renovación" de la EPBD, que busca duplicar la tasa de renovación anual de los edificios para 2030 (como tarde).

5) Eliminación gradual de combustibles fósiles

Esta tecnología contribuye a la eliminación gradual de los combustibles fósiles, otro objetivo clave de la EPBD. Al implementarla mediante el aprovisionamiento de energía renovable, se reduce la dependencia de combustibles fósiles y, por tanto, se apoya directamente esta transición.

Capítulo 9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se lleva a cabo un análisis detallado de los resultados obtenidos en el estudio de viabilidad de integrar la tecnología de captura directa del aire en sistemas HVAC para edificios. Concretamente, el análisis se estructura en torno a cuatro aspectos clave: la implementación de un nuevo módulo S-DAC más pequeño que los disponibles actualmente en el mercado, la estimación de la demanda energética, la evaluación de la viabilidad económica del proyecto y su alineación con la regulación ambiental de la Unión Europea.

Nuevo Módulo S-DAC

Las ventajas concluyentes principales de la implementación del nuevo módulo en comparación con el módulo estándar comercializado por Soletair Power se resumen en la Tabla 30.

Cabe mencionar que, aunque la capacidad de captura por módulo sea menor, el hecho de haber mejorado la modularidad y, por tanto, haber incrementado el número de módulos por edificio, resulta en una mejora de la capacidad a gran escala.

Característica	Módulo Comercial (Soletair Power)	Nuevo Módulo S-DAC
Tamaño	3x3x3 metros	0,4 x0,7x1 metros
Modularidad	Instalación media de 5 módulo por edificio	Instalación estimada de 40 módulos por edificio
Tiempo de Instalación	1 a 3 meses	Menor tiempo de instalación (sin necesidad de modificaciones extensivas o retrofit del sistema HVAC)
Coste de Instalación	Elevado	Reducción significativa de costes de instalación
Capacidad de Captura de CO₂	50 kg/día (~20 toneladas/año por módulo)	1 tonelada/año por módulo
Fuentes de Aire Capturado	Solo aire exterior (400-500 ppm de CO ₂)	Aire exterior y aire recirculado (800-1000 ppm de CO ₂)
Eficiencia de Captura	Basada en CO ₂ del aire exterior	Mayor eficiencia gracias al aire recirculado con mayor concentración de CO ₂
Ciclos de Operación	2 ciclos TVSA al día	3 ciclos TVSA al día
Funcionalidad Adicional	Solo captura de CO ₂	Captura de CO ₂ y purificación del aire interior mediante recirculación y posibilidad de implementar filtros adicionales
Aplicabilidad	Necesidad de grandes espacios para instalación	Adaptable a una variedad de edificios y espacios debido a su menor tamaño

Tabla 30: Comparativa frente a un módulo comercial [Elaboración propia]

Demanda Energética

En lo referente a la demanda de calor del módulo, en la Figura 29 se observa como la mayor parte de la demanda térmica proviene del calor de reacción del CO₂ (47%) y del calor sensible del adsorbente (42%). El proceso de desorción del CO₂ del material adsorbente con aminas es un proceso endotérmico, lo que justifica el alto requerimiento energético para romper los enlaces entre el CO₂ y el componente adsorbente. En lo referente al calor sensible del adsorbente, tiene sentido su alta demanda energética debido a la necesidad de elevar la temperatura de 25°C a 100°C acompañado de una alta eficiencia.

Además, para el caso de implementación de 40 módulos por edificio y, estimando la demanda eléctrica en un 30% de la demanda total (acorde a la bibliografía revisada) se ha obtenido la siguiente demanda energética total:

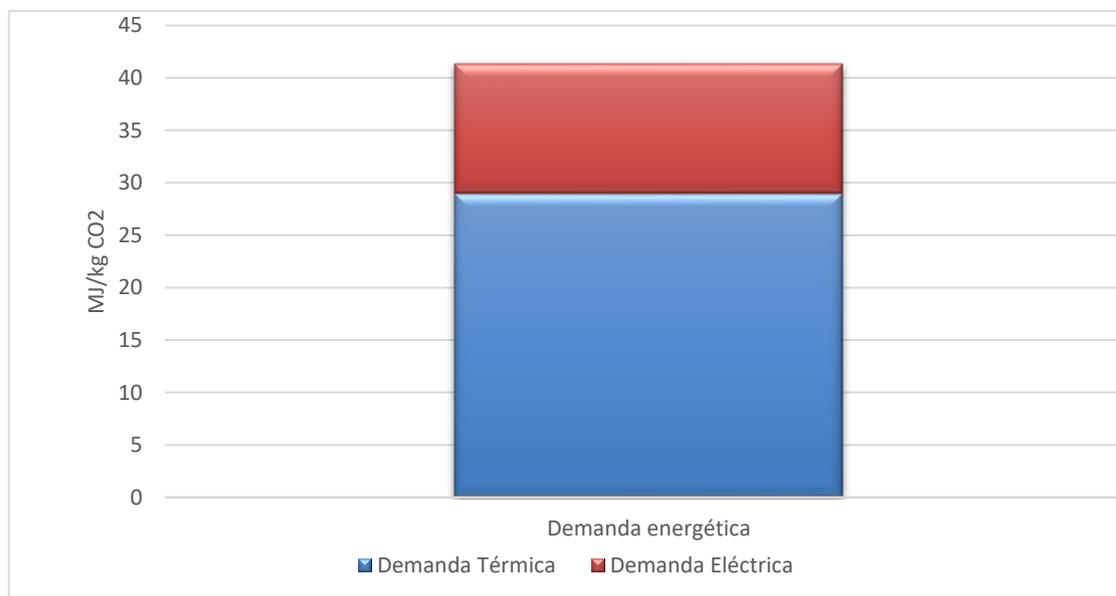


Figura 39: Demanda energética total para el caso de estudio [Elaboración propia]

Viabilidad Económica

Se observa en la Figura 31 que el LCOD de la tecnología actual para las diferentes configuraciones evaluadas en el proyecto no es competitivo en comparación con otras tecnologías de descarbonización. Los valores actuales de LCOD varían desde 587,3 €/ton CO₂ en el caso de Bomba de Calor + Solar Fotovoltaica, hasta 1.027,5 €/ton CO₂ en el caso de Bomba de Calor + Eólica Off-shore. Estos costes son significativamente altos y, en su estado actual, no compiten favorablemente, ni siquiera el caso con el LCOD más bajo, con tecnologías alternativas de reducción de emisiones, como las energías renovables, que presentan costes nivelados por tonelada de CO₂ evitada más bajos (alrededor de 250 €/ton. CO₂ evitada en España en 2021 [60]).

Al analizar los casos específicos (Figura 32, Figura 33 y Figura 34), se observa que el LCOH es el factor que más influencia denota en el LCOD, seguido del LCOE. Esto se debe principalmente al alto requerimiento energético en forma de calor en comparación con la demanda eléctrica del proceso (70-30%).

Las proyecciones hacia 2030 y 2050 (Figura 40) muestran una reducción significativa del LCOD en todos los casos. Esta reducción es impulsada por varios factores, como la disminución del CAPEX debido a los avances tecnológicos, economías de escala, y el aprendizaje que se deriva de la implementación masiva de estas tecnologías. La reducción del LCOE es también crucial, especialmente en el caso de la energía solar, que podría ver sus costos reducidos a 26,7 €/MWh para 2050, haciendo que el LCOD de este caso sea mucho más competitivo. Además, se anticipa que los avances en la tecnología DAC permitirán aumentar la capacidad de captura por módulo, lo que reducirá los costos operativos por tonelada de CO₂ capturada.

Para 2050, el caso más competitivo es claramente el de Bomba de Calor + Solar Fotovoltaica, con un LCOD proyectado de 232 €/ton CO₂. Esta competitividad se debe principalmente a la notable reducción en los costos de inversión y operación, impulsada por la caída del LCOE y la eficiencia en la captura. En comparación, los casos con energía eólica, aunque también experimentan reducciones en los costos, no logran alcanzar los mismos niveles de

competitividad debido a los mayores costes de mantenimiento y, en el caso de la eólica on-shore, debido principalmente al ínfimo crecimiento de las horas de operación de esta tecnología. Sin embargo, para el caso de la eólica marina, su reducción considerable se debe principalmente al incremento de las horas de operación impulsado por la apuesta europea por esta tecnología (se prevé un crecimiento de los 12 GW actuales a los 60 GW acorde al documento de la Comisión Europea “Estrategia UE sobre las Energías Renovables Marinas”).

Por tanto, aunque el LCOD actual de la tecnología no es competitivo con otras tecnologías de descarbonización, las proyecciones para 2030 y 2050 muestran un panorama más optimista, especialmente para la combinación de Bomba de Calor + Solar Fotovoltaica, junto a la Eólica Off-shore. Las reducciones en el CAPEX, LCOE y las mejoras en la eficiencia de captura son factores clave que pueden transformar la viabilidad económica de esta tecnología, haciéndola una opción más atractiva para la reducción de emisiones en el futuro.

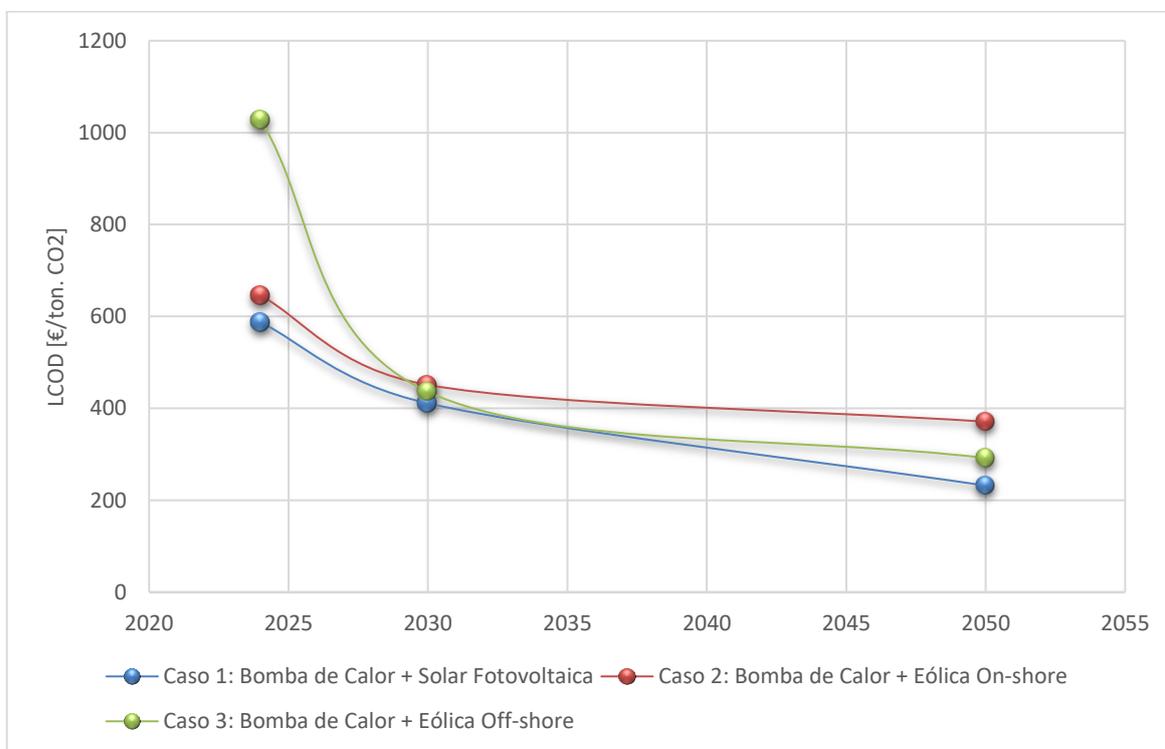


Figura 40: LCOD para los tres casos de estudio actualidad-2050 [Elaboración propia]

En lo referente a la rentabilidad a 20 años, los resultados financieros revelan un VAN positivo de 672,92 €, una TIR del 8,30% y un ROI del 235%, lo que indica que el proyecto no solo es viable, sino también rentable a largo plazo (recuperando la inversión inicial a partir de los 14 años), especialmente gracias al apoyo de subvenciones como el *Innovation Fund* de la UE. Sin embargo, cabe mencionar que se han considerado diversas hipótesis que podrían llegar a modificar el resultado final. No obstante, el estudio se ha llevado a cabo de forma conservadora para reflejar la realidad lo más fielmente posible.

Alineación con la Regulación Ambiental Europea

La Tabla 28 demuestra que este proyecto se alinea directamente con la Taxonomía Europea para las actividades encontradas en el reglamento (Investigación, desarrollo e innovación para la captura aérea directa de CO₂; Servicios profesionales relacionados con la eficiencia energética de los edificios) al cumplimentar los requisitos establecidos en la normativa: contribuir significativamente a, mínimo, uno de los seis objetivos medioambientales (Mitigación del Cambio Climático en este caso), no originar daños significativos al resto de los objetivos y cumplir las garantías sociales mínimas (validad automáticamente).

Además, la implementación de esta tecnología se alinea de manera significativa con los objetivos de la EPBD, contribuyendo directamente a la reducción de emisiones y a la mejora de la eficiencia energética. El proyecto se posiciona como una solución innovadora y eficaz para cumplir con los hitos temporales establecidos en la normativa, ya que permite la captura de CO₂ directamente del aire y su integración con sistemas de energía renovable. De esta forma, no solo se reduce la huella de carbono de los edificios, sino que también facilita la transición hacia un parque mobiliario construido más sostenible y eficiente energéticamente.

Por tanto, el alineamiento con ambas directivas no solo refuerza la viabilidad regulatoria del proyecto, sino que también lo posiciona como una opción atractiva para acceder a financiación verde y otros incentivos dentro del marco de la UE.

Capítulo 10. CONCLUSIONES Y TRABAJOS

FUTUROS

A la vista del análisis de resultados llevado a cabo en el capítulo previo, se puede llegar a las siguientes conclusiones.

Por un lado, en términos de instalación, se ha demostrado la viabilidad de integrar la tecnología en edificios. La implementación del nuevo módulo S-DAC de menor tamaño y modular demuestra ventajas claras en términos de flexibilidad, y eficiencia de captura de CO₂ en comparación con los módulos comerciales actuales. La capacidad de instalar hasta 40 módulos por edificio y la posibilidad de capturar CO₂ tanto del aire exterior como del aire recirculado dentro del edificio, hacen que esta solución sea capaz de optimizar la eficiencia operativa, así como de reducir los costes ligados a la instalación.

Por otro lado, en lo que respecta a la viabilidad económica, los resultados actuales del LCOD muestran que la tecnología no es competitiva en comparación con otras alternativas de descarbonización disponibles en el mercado. Sin embargo, las proyecciones hacia 2030 y 2050, período en el que la legislación europea de emisiones va a ser más estricta hasta alcanzar el “*Net Zero Senario*” en 2050, sugieren una mejora significativa en la competitividad económica a largo plazo.

En lo referente a los próximos pasos, es conveniente estudiar otras opciones de aprovisionamiento energético. Se podría llevar a cabo un estudio de la integración del almacenamiento térmico mediante bombeo reversible (TI-PTES) en los sistemas DAC. Esta tecnología permitiría optimizar el uso de energía térmica, reduciendo así el LCOH del proceso de captura de CO₂. Al aprovechar la capacidad del TI-PTES para almacenar y recuperar energía térmica de manera eficiente, se podría mejorar la viabilidad económica del sistema, haciéndolo más competitivo frente a otras tecnologías de descarbonización.

Además, sería importante realizar un estudio de viabilidad en el que se incluyan los posibles usos del CO₂ capturado con el fin de lograr una reducción de los costes.

Capítulo 11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] World Economic Forum, “The Global Risk Report 2024,” 2024. [Online]. Available: www.weforum.org
- [2] M. Ge, J. Friedrich, and L. Vigna, “Cuatro gráficos que explican las emisiones de gases de efecto invernadero por país y por sector,” Sep. 02, 2021. Accessed: Apr. 12, 2024. [Online]. Available: <https://es.wri.org/insights/cuatro-graficos-que-explican-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-por>
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Climate Change 2014: Synthesis Report,” Oct. 2014. Accessed: Apr. 12, 2024. [Online]. Available: <https://archive.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- [4] Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), “Emisiones de dióxido de carbono,” Jun. 2023. Accessed: Apr. 12, 2024. [Online]. Available: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>
- [5] Consejo de la Unión Europea, “Pacto Verde Europeo.” Accessed: Apr. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20el%20Pacto%20Verde,clim%C3%A1tica%20de%20aqu%C3%AD%20a%202050>
- [6] Confederación Española de Organizaciones Empresariales (CEOE), “Claves del Paquete Fit For 55 de la Comisión Europea,” 2022.
- [7] International Energy Agency (IEA), “Direct Air Capture: A key technology for net zero”.
- [8] D. Sandalow, J. Friedmann, C. McCormick, and S. McCoy, “Direct Air Capture of Carbon Dioxide,” Dec. 2018.

- [9] H. Azarabadi *et al.*, “Shifting the Direct Air Capture Paradigm.” Jun. 05, 2023. Accessed: Apr. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.bcg.com/publications/2023/solving-direct-air-carbon-capture-challenge>
- [10] M. Ozkan, S. P. Nayak, A. D. Ruiz, and W. Jiang, “Current status and pillars of direct air capture technologies,” *iScience*, vol. 25, p. 103990, 2022, doi: 10.1016/j.isci.
- [11] V. Barahimi, M. Ho, and E. Croiset, “From Lab to Fab: Development and Deployment of Direct Air Capture of CO₂,” Sep. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/en16176385.
- [12] S. Fujikawa, R. Selyanchyn, and T. Kunitake, “A new strategy for membrane-based direct air capture,” Jan. 01, 2021, *Springer Nature*. doi: 10.1038/s41428-020-00429-z.
- [13] S. K. S. Boetcher, J. B. Perskin, Y. Maidenberg, M. J. Traum, and T. von Hippel, “Direct atmospheric cryogenic carbon capture in cold climates,” *Carbon Capture Science and Technology*, vol. 8, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.ccst.2023.100127.
- [14] T. Von Hippel, “Thermal removal of carbon dioxide from the atmosphere: energy requirements and scaling issues,” vol. 148, pp. 491–501, 2018.
- [15] S. Voskian and T. A. Hatton, “Faradaic electro-swing reactive adsorption for CO₂ capture,” *Energy Environ Sci*, vol. 12, no. 12, pp. 3530–3547, Dec. 2019, doi: 10.1039/c9ee02412c.
- [16] B. Skinner and R. Lalit, “Concrete: 8% of global emissions and rising. Which innovations can achieve net zero by 2050?,” Jan. 23, 2023. Accessed: Apr. 24, 2024. [Online]. Available: <https://energypost.eu/concrete-8-of-global-emissions-and-rising-which-innovations-can-achieve-net-zero-by-2050/#:~:text=Concrete%3A%208%25%20of%20global%20carbon,strength%2Dcontributing%20ingredient%20of%20concrete.>

-
- [17] Aramco, “Carbon Curing.” Accessed: Apr. 24, 2024. [Online]. Available: <https://europe.aramco.com/en/sustainability/climate-change/managing-our-footprint/carbon-curing>
- [18] G. Collodi and F. Wheeler, “Hydrogen Production via Steam Reforming with CO₂ Capture.”
- [19] I. FASTERHOLDT, A. Lee, K. Kidholm, K. B. YDERSTRÆDE, and K. M. PEDERSEN, “A qualitative exploration of early assessment of innovative medical technologies,” *BMC Health Serv Res*, vol. 18, no. 1, Nov. 2018, doi: 10.1186/s12913-018-3647-z.
- [20] F. Gándara and F. Gándara, “Investigación Química Metal-organic frameworks: nuevos materiales con espacios llenos de posibilidades,” 2012. [Online]. Available: www.rseq.org
- [21] D. Britt, H. Furukawa, B. Wang, T. G. Glover, and O. M. Yaghi, “Highly efficient separation of carbon dioxide by a metal-organic framework replete with open metal sites.” [Online]. Available: www.pnas.org/cgi/content/full/
- [22] B. M. Balasubramaniam, P. T. Thierry, S. Lethier, V. Pugnet, P. Llewellyn, and A. Rajendran, “Process-performance of solid sorbents for Direct Air Capture (DAC) of CO₂ in optimized temperature-vacuum swing adsorption (TVSA) cycles,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 485, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.149568.
- [23] Z. Chen, S. Deng, H. Wei, B. Wang, J. Huang, and G. Yu, “Activated carbons and amine-modified materials for carbon dioxide capture -- A review,” *Front Environ Sci Eng*, vol. 7, no. 3, pp. 326–340, 2013, doi: 10.1007/s11783-013-0510-7.
- [24] J. Valentine and A. Zoelle, “DIRECT AIR CAPTURE CASE STUDIES: SORBENT SYSTEM,” 2022.
- [25] L. Chen, S. Deng, R. Zhao, Y. Zhu, L. Zhao, and S. Li, “Temperature swing adsorption for CO₂ capture: Thermal design and management on adsorption bed with

- single-tube/three-tube internal heat exchanger,” *Appl Therm Eng*, vol. 199, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117538.
- [26] M. Fasihi, O. Efimova, and C. Breyer, “Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants,” *J Clean Prod*, vol. 224, pp. 957–980, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.086.
- [27] W. K. Shi *et al.*, “Temperature-vacuum swing adsorption for direct air capture by using low-grade heat,” *J Clean Prod*, vol. 414, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137731.
- [28] C. Chao, Y. Deng, R. Dewil, J. Baeyens, and X. Fan, “Post-combustion carbon capture,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 138, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110490.
- [29] X. Zhu, T. Ge, F. Yang, and R. Wang, “Design of steam-assisted temperature vacuum-swing adsorption processes for efficient CO₂ capture from ambient air,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 137, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110651.
- [30] Soletair Power, “Technical Specifications of HVAC Integrated Direct Air Capture Unit – How Building CO₂ Capture Works,” Jan. 21, 2022. Accessed: Apr. 12, 2024. [Online]. Available: Technical Specifications of HVAC Integrated Direct Air Capture Unit – How Building CO₂ Capture Works
- [31] Soletair Power, “Soletair Power’s Building Carbon Capture Technology,” 2023, Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.soletairpower.fi/technology/>
- [32] D. W. Keith, G. Holmes, D. St. Angelo, and K. Heidel, “A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere,” *Joule*, vol. 2, no. 8, pp. 1573–1594, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.joule.2018.05.006.

- [33] H. Wynne, “Is Solar Cost Effective at Reducing Carbon Emissions?,” *LinkedIn*, Sep. 27, 2023. Accessed: May 13, 2024. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/solar-cost-effective-reducing-carbon-emissions-hugh-wynne/>
- [34] B. M. Balasubramaniam, P. T. Thierry, S. Lethier, V. Pugnet, P. Llewellyn, and A. Rajendran, “Process-performance of solid sorbents for Direct Air Capture (DAC) of CO₂ in optimized temperature-vacuum swing adsorption (TVSA) cycles,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 485, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.149568.
- [35] G. Leonzio, P. S. Fennell, and N. Shah, “A Comparative Study of Different Sorbents in the Context of Direct Air Capture (DAC): Evaluation of Key Performance Indicators and Comparisons,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 5, Mar. 2022, doi: 10.3390/app12052618.
- [36] J. Young, E. García-Díez, S. Garcia, and M. Van Der Spek, “The impact of binary water-CO₂ isotherm models on the optimal performance of sorbent-based direct air capture processes,” *Energy Environ Sci*, vol. 14, no. 10, pp. 5377–5394, Oct. 2021, doi: 10.1039/d1ee01272j.
- [37] Soletair Power, “Soletair Power Carbon Capture Technology.” Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.soletairpower.fi/technology/>
- [38] Pfeiffer Vacuum, “Ficha técnica Bomba de Vacío DVI 205 M, Mini-inline valve, solenoid actuated, without PI, n. o.” Accessed: Aug. 05, 2024. [Online]. Available: https://www.pfeiffer-vacuum.com/global/en/shop/products/PF_H13_233
- [39] M. J. Bos, V. Kroeze, S. Sutanto, and D. W. F. Brilman, “Evaluating Regeneration Options of Solid Amine Sorbent for CO₂ Removal,” *Ind Eng Chem Res*, vol. 57, no. 32, pp. 11141–11153, Aug. 2018, doi: 10.1021/acs.iecr.8b00768.

- [40] Linuo Ritter, “Ficha Técnica Bomba de Calor Cascade Air Source High Temp.” Accessed: Aug. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.linuo-ritter.com/Cascade-Air-Source-High-Temp-Heat-Pump-Water-Heater-pd40742850.html>
- [41] M. Fasihi, O. Efimova, and C. Breyer, “Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants,” *J Clean Prod*, vol. 224, pp. 957–980, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.086.
- [42] International Energy Agency (IEA), “World Energy Outlook 2023,” 2023. [Online]. Available: www.iea.org/terms
- [43] *Orden TED/1161/2020, de 4 de diciembre, por la que se regula el primer mecanismo de subasta para el otorgamiento del régimen económico de energías renovables y se establece el calendario indicativo para el periodo 2020-2025.*
- [44] C. Raso, “El sector eólico pide tener en cuenta los vertidos en los proyectos marinos,” Mar. 31, 2024. Accessed: May 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.eleconomista.es/energia/noticias/12746113/03/24/el-sector-eolico-pide-tener-en-cuenta-los-vertidos-en-los-proyectos-marinos.html#:~:text=Asimismo%2C%20proponen%20ampliar%20el%20n%C3%BAmero,para%20la%20e%C3%B3lica%20en%20general.>
- [45] NREL, “Financial Cases and Methods.” Accessed: Aug. 05, 2024. [Online]. Available: https://atb.nrel.gov/electricity/2023/financial_cases_&_methods
- [46] International Energy Agency (IEA), “The Future of Heat Pumps.” [Online]. Available: www.iea.org
- [47] Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, “INFORME SOBRE EL RESULTADO DE LA 3ª Y 4ª SUBASTAS PARA EL OTORGAMIENTO DEL RÉGIMEN ECONÓMICO DE ENERGÍAS RENOVABLES,” Jul. 2023. [Online]. Available: www.cnmc.es

-
- [48] Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, “BOLETÍN ANUAL DE MERCADOS A PLAZO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ESPAÑA (BALANCE 2023),” Apr. 2024.
- [49] G. Mantulet, A. Peffen, and S. Cail, “Carbon price forecast under the EU ETS,” Nov. 2023.
- [50] VAISALA, “Ventilación controlada por demanda”, Accessed: Aug. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.vaisala.com/es/industries-applications/hvac-measurement/demand-controlled-ventilation>
- [51] REE, “Red Eléctrica.” Accessed: Aug. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-del-sistema-electrico/mercados/precio-medio-final>
- [52] European Public Real Estate Association (EPRA), “EPRA statement on the closing of COP26,” 2022, Accessed: May 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.epra.com/press-corner/press-releases/epra-statement-closing-cop26>
- [53] Parlamento Europeo y Consejo, “Reglamento (UE) 2020/852 del Parlamento Europeo Y del Consejo de 18 de junio de 2020 relativo al establecimiento de un marco para facilitar las inversiones sostenibles y por el que se modifica el Reglamento (UE) 2019/2088”.
- [54] Organización Internacional del Trabajo (OIT), “Convenios, protocolos y recomendaciones.” Accessed: May 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.ilo.org/es/normas-internacionales-del-trabajo/convenios-protocolos-y-recomendaciones>
- [55] Parlamento Europeo y Consejo, *REGLAMENTO (CE) No 1893/2006 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 20 de diciembre de 2006 por el que se establece la nomenclatura estadística de actividades económicas NACE Revisión*

- 2 y por el que se modifica el Reglamento (CEE) no 3037/90 del Consejo y determinados Reglamentos de la CE sobre aspectos estadísticos específicos.*
- [56] Parlamento Europeo y del Consejo, “Directiva (UE) 2024/1275 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de abril de 2024, relativa a la eficiencia energética de los edificios, (refundición).” [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>
- [57] ECODES, “Hacia una Europa saludable y renovada: edificios rehabilitados,” 2023. Accessed: Jun. 13, 2024. [Online]. Available: <https://ecodes.org/hacemos/energia-y-personas/rehabilitacion-energetica-de-viviendas/hacia-una-europa-saludable-y-renovada-edificios-rehabilitados#:~:text=En%20el%20conjunto%20de%20Europa,consumo%20energ%C3%A9tico%20es%20del%2030%25.>
- [58] A. Dobaran, “Análisis de la Directiva Europea de Eficiencia Energética en los Edificios (EPBD),” Mar. 2024, Accessed: Jun. 13, 2024. [Online]. Available: [https://www.interempresas.net/Climatizacion/Articulos/557459-Analisis-de-la-Directiva-Europea-de-Eficiencia-Energetica-en-los-Edificios-\(EPBD\).html](https://www.interempresas.net/Climatizacion/Articulos/557459-Analisis-de-la-Directiva-Europea-de-Eficiencia-Energetica-en-los-Edificios-(EPBD).html)
- [59] IDAE and E. y T. Ministerio de Industria, “Calificación de la eficiencia energética de los edificios.”
- [60] Energreen Spain, “¿Qué cantidad de CO2 se previene con el uso de energía solar fotovoltaica en España?,” May 08, 2023. Accessed: Aug. 10, 2024. [Online]. Available: <https://energreespain.com/que-cantidad-de-co2-se-previene-con-el-uso-de-energia-solar-fotovoltaica-en-espana/>

ANEXO I: ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

- **ODS 3: Salud y Bienestar**

Este proyecto contribuye directamente a mejorar la calidad del aire interior, lo que a su vez promueve la salud y el bienestar de los ocupantes de los edificios. La captura de CO₂ del aire exterior, así como su integración en sistemas HVAC, reduce el riesgo de enfermedades respiratorias y crea un entorno más saludable para trabajar y vivir.



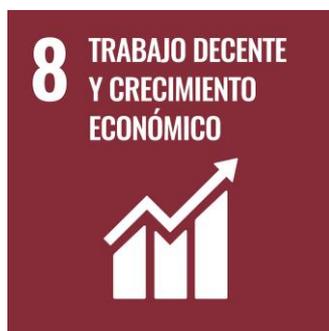
- **ODS 7: Energía Asequible y No Contaminante**

La integración de tecnologías de este tipo ayuda a reducir la huella de carbono de los edificios al capturar el CO₂ del aire ambiente. De esta forma, se promueve el uso de fuentes de energía más limpias y sostenibles al reducir la dependencia de combustibles fósiles para la climatización y ventilación de edificios.



- **ODS 8: Trabajo Decente y Crecimiento Económico**

La implementación de esta tecnología puede generar nuevas oportunidades de empleo en sectores relacionados con la ingeniería, la construcción, la gestión de proyectos y la investigación. A medida que aumenta la demanda de expertos en tecnologías sostenibles, se espera la creación de un número significativo de empleos especializados, contribuyendo así a la creación de trabajo decente y al crecimiento económico.



- **ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura**

La investigación y aplicación de esta clase de tecnologías innovadoras refleja un compromiso con el desarrollo de infraestructuras sostenibles además de promover la innovación tecnológica en el sector industrial. Este proyecto puede servir de ejemplo para impulsar la adopción de prácticas más sostenibles en la industria de la construcción y la gestión de climatización de edificios.



- **ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles**

La tecnología DAC sumada a la tecnología de calidad de aire interior promueve entornos urbanos más saludables y habitables para sus habitantes (al capturar el CO₂ del aire ambiente), además de la sostenibilidad entre los ocupantes de los edificios (al ser la calidad del aire interior un factor importante del proyecto).



- **ODS 12: Producción y Consumo Responsable**

Las diversas aplicaciones del CO₂ capturado (combustibles sintéticos, energías limpias como el hidrógeno, hormigón, entre otras) promueven prácticas de producción y consumo responsables que reducen la dependencia de recursos no renovables y minimizan el impacto ambiental.



- **ODS 13: Acción por el Clima**

Por último, en línea con los ODSs expuestos anteriormente, este proyecto se alinea con la mitigación del cambio climático al abordar directamente el problema de la concentración de CO₂ en el aire. Por lo tanto, se contribuye a limitar el calentamiento global y sus impactos adversos tanto en el clima como en el medio ambiente.



- **ODS 17: Alianzas para Lograr los Objetivos**

La implementación de la tecnología DAC, así como su proceso de desarrollo y su posterior viabilidad, requerirá de transferencias e intercambios de recursos y conocimiento entre empresas, el sector privado, instituciones académicas... Por tanto, las alianzas y colaboraciones entre los diferentes agentes son cruciales para implementar esta tecnología.

