



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación multicriterio de tecnologías de captura de CO₂
mediante métodos de análisis de decisión*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Nicolás Gilabert Gamboa

DIRECTORES: Rocío Maceiras Castro

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación multicriterio de tecnologías de captura de CO₂
mediante métodos de análisis de decisión*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El calentamiento global, provocado principalmente por las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono (CO₂) constituye uno de los mayores desafíos actuales para la humanidad. Ante esta problemática, surgen las tecnologías CCUS (Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono), un conjunto de procesos que permiten capturar el gas en el punto de emisión, transportarlo y destinarlo a su almacenamiento permanente o su utilización.

Este Trabajo de Fin de Grado se centra en la primera etapa del proceso, realizando una evaluación multicriterio de diversas tecnologías de captura (absorción química, adsorción, separación mediante membranas y criogenización). Para ello, se aplican los métodos de decisión multicriterio AHP (Proceso de Análisis Jerárquico) y VIKOR (Optimización multicriterio y solución de compromiso), evaluando a las tecnologías estudiadas bajo siete criterios (eficiencia, coste, consumo energético, madurez tecnológica, seguridad, escalabilidad e impacto ambiental). Asimismo, se incorpora un análisis de sensibilidad para examinar la estabilidad y robustez del modelo frente a variaciones en la ponderación de los criterios.

Los resultados ponen de manifiesto que, si bien estas tecnologías presentan un elevado potencial para la mitigación de emisiones en fuentes concentradas, resultan insuficientes para alcanzar los objetivos climáticos. En este contexto, se analiza de forma complementaria la tecnología emergente de captura directa del aire (DAC, Direct Air Capture), que permite abordar emisiones difusas al capturar CO₂ directamente de la atmósfera, ampliando así el alcance de las estrategias de mitigación.

PALABRAS CLAVE

Calentamiento global, dióxido de carbono, tecnologías de captura, análisis multicriterio, DAC.

AGRADECIMIENTOS

Los agradecimientos irán dirigidos a aquellas personas que han hecho posible que este Trabajo de Fin de Grado se haya podido hacer y finalizar.

Es por ello por lo que en primer lugar me gustaría expresar mi agradecimiento a mi tutora Rocío Maceiras. Durante la realización del trabajo nunca he sentido estar solo ante el amplio mundo de la química y las matemáticas, y siempre he podido contar con su apoyo para consultar dudas, ideas y correcciones. Además, su carácter exigente y pulcritud sobre el formato de la presente memoria me ha servido para sentar las bases en la realización de documentos profesionales, que seguro que la Armada me demandará a lo largo de toda mi carrera.

En segundo lugar, agradecer a mis padres, que durante estos meses me han mostrado su interés y preocupación, preguntándome cómo iba con el trabajo cada vez que hablaba con ellos y me animaban a seguir trabajando de la manera que me han enseñado desde pequeño: “cuando hagas algo, intenta hacerlo lo mejor posible”.

Para haber llegado al momento en el que he realizado el trabajo que me permite egresar de la Escuela Naval, debo de agradecer a aquellos que me han motivado a ingresar y me han acompañado durante estos años. Mi ingreso en la Armada se debe en gran parte a los marinos de mi familia, especialmente a mi abuelo Victoriano, el cual fue el primero en animarse en conocer este mundo. Su pasión la supo transmitir entre generaciones haciendo que dos de sus hijos y cuatro de sus nietos hayan decidido tomar el mismo camino.

Las personas que han hecho que mi etapa en la Escuela haya sido agradable y llena de buenos recuerdos son mi familia y amigos. Mi núcleo familiar compuesto por padres, hermanos, cuñados y sobrinos son el mejor apoyo que alguien puede tener y han hecho que cada permiso de vacaciones me sirva de desconexión. Querría resaltar a mi hermano y padrino Víctor, el cual ha estado destinado en la Escuela 3 años de los 5 que he estado. Es una suerte haber tenido el apoyo familiar que he mencionado antes tan cerca.

Cuando hablo de mis amigos me refiero a la promoción 426-156. Nunca he tenido tan buenos amigos como los que he hecho aquí, de hecho, los podría considerar mi segunda familia ya que con ellos he convivido estrechamente y he tenido todo tipo de experiencias: el sufrimiento y diversión de primero, las largas jornadas de estudio en segundo, haber navegado medio mundo en tercero, haber sido su brigadier poniéndome las cosas fáciles en cuarto y despedir todas estas vivencias en quinto. Han sido años muy buenos y nos seguiremos ayudando mutuamente en los barcos, tal y como hemos hecho aquí.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	8
1.1 Justificación y motivación	8
1.2 Objetivos	9
1.3 Estructura del proyecto	9
2 Estado del arte	11
2.1 Problemática de las emisiones de CO ₂	11
2.1.1 El CO ₂ y su papel en el cambio climático.....	11
2.1.2 Principales fuentes de emisión de CO ₂	13
2.1.2.1 Generación de electricidad y producción de energía.....	13
2.1.2.2 Industria pesada y procesos industriales.....	14
2.1.2.3 Transporte.....	14
2.1.2.4 Uso de los suelos	14
2.1.3 Compromisos internacionales contra el cambio climático	14
2.2 Captura, transporte, utilización y almacenamiento del CO ₂	16
2.2.1 Captura de CO ₂	17
2.2.2 Transporte de CO ₂	17
2.2.2.1 Transporte por tuberías	17
2.2.2.2 Transporte marítimo	18
2.2.3 Utilización de CO ₂	18
2.2.4 Almacenamiento de CO ₂	19
2.2.4.1 Acuíferos salinos profundos	19
2.2.4.2 Yacimientos de petróleo y gas agotados.....	19
2.2.4.3 Capas de carbón no explotables y mineralización.....	19
2.3 Estrategias de captura de CO ₂	20
2.3.1 Postcombustión.....	20
2.3.2 Precombustión	21
2.3.3 Oxidación.....	21
2.4 Tecnologías de captura de CO ₂ en postcombustión	22
2.4.1 Absorción.....	22
2.4.1.1 Absorción física.....	22

2.4.1.2 Absorción química.....	23
2.4.2 Adsorción.....	24
2.4.3 Separación mediante membranas.....	25
2.4.4 Criogenización.....	26
2.5 Métodos de decisión multicriterio.....	27
2.5.1 Características comunes de la decisión multicriterio.....	28
2.5.2 Clasificación de los métodos de análisis multicriterio	28
2.5.2.1 Métodos de puntuación directa.....	29
2.5.2.2 Métodos basados en la distancia.....	29
2.5.2.3 Métodos de comparación por pares	30
2.5.2.4 Métodos de superación	30
2.5.2.5 Métodos basados en funciones de utilidad o valor	30
3 Desarrollo del TFG.....	31
3.1 Método AHP	31
3.1.1 Introducción al método AHP	31
3.1.2 Definición de la estructura jerárquica.....	32
3.1.3 Construcción de las matrices de comparación.....	33
3.1.4 Cálculo del vector de prioridad.....	34
3.1.5 Comprobación de consistencia del método	35
3.1.6 Determinación del ranking de prioridad	36
3.2 Método VIKOR.....	37
3.2.1 Introducción al método	37
3.2.2 Construcción de la matriz de decisión	38
3.2.3 Determinación del mejor y peor valor por cada criterio	38
3.2.4 Cálculo de la medida de utilidad y de arrepentimiento	38
3.2.5 Cálculo de índice de compromiso y ordenación de las alternativas	39
3.2.6 Verificación	39
3.3 Criterios seleccionados para la evaluación de alternativas	40
3.3.1 Eficiencia	40
3.3.2 Consumo energético	41
3.3.3 Madurez tecnológica.....	42
3.3.4 Seguridad	43
3.3.5 Coste	44
3.3.6 Escalabilidad.....	45
3.3.7 Impacto ambiental	45
4 Resultados y discusión	48

4.1 Resultados aplicando el método AHP	48
4.1.1 Ponderación de criterios	48
4.1.2 Ponderación de alternativas en base a criterios	50
4.2 Resultados aplicando el método VIKOR	54
4.3 Análisis de sensibilidad.....	56
4.3.1 Análisis de sensibilidad en AHP.....	58
4.3.2 Análisis de sensibilidad en VIKOR.....	60
5 Nuevas estrategias de captura.....	62
5.1 Introducción a la tecnología DAC	62
5.1.1 Definición y concepto.....	62
5.1.2 Ventajas y limitaciones.....	63
5.2 Funcionamiento y tipos de DAC.....	63
5.2.1 Etapas del proceso	63
5.2.2 Tecnologías DAC existentes.....	64
5.2.2.1 Tecnología basada en solución acuosa a alta temperatura	64
5.2.2.2 Tecnología basada en adsorbentes sólidos a baja temperatura.....	65
5.2.2.3 Otras tecnologías emergentes	66
5.3 Estado actual de la tecnología	67
5.4 Posicionamiento frente a las tecnologías de captura convencionales	69
5.4.1 Diferencias entre DAC y las tecnologías analizadas	69
5.4.2 Papel en la mitigación del cambio climático	69
6 Conclusiones y líneas futuras	71
6.1 Conclusiones	71
6.2 Líneas futuras	72
7 Bibliografía.....	73
Anexo I: Implicaciones Sociales, económicas, y ambientales	79
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	80
Anexo III: Tablas correspondientes al desarrollo del método AHP.....	81
Anexo IV: Uso ético y responsable de la Inteligencia Artificial.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Emisiones de CO ₂ a la atmósfera en los últimos años (datos recogidos en [4]).....	11
Figura 2-2 Concentración (ppm) de los GEI en la atmósfera (datos recogidos en [7])	12
Figura 2-3 Aumento de la temperatura media global en los últimos años (datos recogidos en [7])	12
Figura 2-4 Fuentes de emisión de CO ₂ (datos recogidos en [8]).....	13
Figura 2-5 Central térmica de Soto de Ribera [9]	13
Figura 2-6. Toyota Corolla	14
Figura 2-7 CMNUCC de Río de Janeiro de 1992 [15].....	15
Figura 2-8 Proceso CCUS (autoría propia)	17
Figura 2-9 Buque con tanques criogénicos a bordo para transportar CO ₂ [23].....	18
Figura 2-10 Ciclo de captura y utilización del carbono [20].....	18
Figura 2-11 Petrolíferas en el Mar del Norte junto al yacimiento agotado Nini [27]	19
Figura 2-12 Basalto con CO ₂ inyectado mediante mineralización de carbonatos [28].....	20
Figura 2-13 Proceso de postcombustión (autoría propia, basado en [31])	20
Figura 2-14 Proceso de precombustión (autoría propia, basado en [31]).....	21
Figura 2-15 Proceso de oxidación (autoría propia, basado en [31]).....	21
Figura 2-16 Esquema general del proceso de absorción química (autoría propia)	24
Figura 2-17 Diferencia entre adsorción y absorción (autoría propia)	24
Figura 2-18 Esquema de la membrana de separación de gases (autoría propia).....	26
Figura 2-19 Diagrama de fases del CO ₂ (autoría propia, datos recogidos en [38]).....	27
Figura 2-20 Clasificación de los métodos MCDM (autoría propia)	29
Figura 3-1 Diagrama de flujo del método AHP	31
Figura 3-2 Modelo jerárquico para la toma de decisiones con el modelo AHP.....	32
Figura 3-3 Función matemática para hallar los valores de comparación (basado en [44]).....	34
Figura 3-4 Soluciones ideales y de compromiso (basado en [51]).....	37
Figura 3-5 Diagrama de flujo del método VIKOR.....	37
Figura 3-6 Ranking de alternativas según la eficiencia.....	41
Figura 3-7 Ranking de alternativas según el consumo energético	42
Figura 3-8 Niveles de maduración tecnológica (autoría propia)	42
Figura 3-9 Ranking de alternativas según la madurez tecnológica	43
Figura 3-10 Ranking de alternativas según la seguridad.....	44
Figura 3-11 Ranking de alternativas según el coste	44
Figura 3-12 Ranking de alternativas según la escalabilidad	45
Figura 3-13 Ranking de alternativas según el impacto ambiental.....	46
Figura 4-1 Gráficos radar de cada alternativa según vectores de prioridad	53
Figura 4-2 Variación del ranking aplicando: a) +10%, b) -10%	59

Figura 4-3 Variación del ranking aplicando: a) +20%, b) -20%	59
Figura 5-1 Klaus Lackner junto con su prototipo de DAC [59]	63
Figura 5-2 Esquema general del proceso DAC (autoría propia, basado en [60])	64
Figura 5-3 Diagrama esquemático de los procesos L-DAC (autoría propia)	64
Figura 5-4 Flujo del proceso de la tecnología S-DAC	65
Figura 5-5 Christoph Gebald y Jan Wurzbacher, fundadores de Climeworks [70]	67
Figura 5-6 Planta DAC Mammoth, Islandia [71]	67
Figura 5-7 Boceto de la planta DAC del proyecto Oxy-CE [74]	68
Figura 5-8 Evolución de los costes de inversión y la capacidad de captura en DAC en las próximas décadas [61]	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Ranking de países emisores de CO ₂ en el año 2024 (datos recogidos en [18, 19])	16
Tabla 2-2 Comparación entre las estrategias de captura de CO ₂ (basado en [30, 33])	22
Tabla 2-3 Disolventes comerciales más comunes en la absorción física (basado en [32])	23
Tabla 2-4 Cualidades de adsorbentes, basado en [30, 36]	25
Tabla 2-5 Elementos del análisis de decisión	28
Tabla 3-1 Escala de comparación de Saaty (basado en [48])	33
Tabla 3-2 Valores del Índice aleatorio (basado en [47])	36
Tabla 3-3 Matriz de decisión (autoría propia)	38
Tabla 3-4 Solución de compromiso según cumplimiento de condiciones	40
Tabla 3-5 Resumen de alternativas en función de los criterios [20, 52-56]	46
Tabla 3-6 Ventajas y desventajas de cada alternativa [52, 53, 56]	47
Tabla 4-1 Orden de prioridad de los criterios	49
Tabla 4-2 Matriz de comparaciones pareada de criterios	49
Tabla 4-3 Normalización de la matriz de comparaciones pareada de criterios	49
Tabla 4-4 Pesos relativos de los criterios (W)	50
Tabla 4-5 Matriz de comparaciones pareada de alternativas según la eficiencia	50
Tabla 4-6 Normalización y cálculo del vector de prioridad según la eficiencia	51
Tabla 4-7 Comprobación de consistencia de los resultados según la eficiencia	51
Tabla 4-8 Resolución global del método AHP	52
Tabla 4-9 Multiplicación de los vectores de prioridad y peso de criterios	53
Tabla 4-10 Ranking final de alternativas	54
Tabla 4-11 Matriz de decisión	54
Tabla 4-12 Normalización y cálculo de <i>Si</i> y <i>Ri</i>	55
Tabla 4-13 Cálculo del índice de compromiso	55
Tabla 4-14 Modificación de los pesos de los criterios aplicando +10%	57
Tabla 4-15 Modificación de los pesos de los criterios aplicando -10%	57
Tabla 4-16 Modificación de los pesos de los criterios aplicando -10%	57
Tabla 4-17 Modificación de los pesos de los criterios aplicando -20%	58
Tabla 4-18 Nuevos resultados de AHP aplicando los distintos porcentajes a los criterios	58
Tabla 4-19 Frecuencia de posiciones en el ranking	60
Tabla 4-20 Nuevos resultados de VIKOR aplicando los distintos porcentajes a los criterios	60
Tabla 5-1 Comparación entre L-DAC y S-DAC [58]	66
Tabla 5-2 Principales plantas DAC actualmente en funcionamiento [58]	68
Tabla 5-3 Comparación de DAC con las tecnologías analizadas [20]	69
Tabla A3-1 Matriz de comparaciones pareada según el consumo energético	81

Tabla A3-2 Normalización y cálculo del vector de prioridad según el consumo energético	81
Tabla A3-3 Comprobación de consistencia de los resultados según el consumo energético.....	81
Tabla A3-4 Matriz de comparaciones pareada según la madurez tecnológica	81
Tabla A3-5 Normalización y cálculo del vector de prioridad según la madurez tecnológica.....	82
Tabla A3-6 Comprobación de consistencia de los resultados según la madurez tecnológica.....	82
Tabla A3-7 Matriz de comparaciones pareada según la seguridad	82
Tabla A3-8 Normalización y cálculo del vector de prioridad según la seguridad	82
Tabla A3-9 Comprobación de consistencia de los resultados según la seguridad	82
Tabla A3-10 Matriz de comparaciones pareada según el coste	83
Tabla A3-11 Normalización y cálculo del vector de prioridad según el coste.....	83
Tabla A3-12 Comprobación de consistencia de los resultados según el coste.....	83
Tabla A3-13 Matriz de comparaciones pareada según la escalabilidad.....	83
Tabla A3-14 Normalización y cálculo del vector de prioridad según la escalabilidad.....	83
Tabla A3-15 Comprobación de consistencia de los resultados según la escalabilidad.....	84
Tabla A3-16 Matriz de comparaciones pareada según el impacto ambiental	84
Tabla A3-17 Normalización y cálculo del vector de prioridad según el impacto ambiental	84
Tabla A3-18 Comprobación de consistencia de los resultados según el impacto ambiental	84

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Justificación y motivación

Uno de los principales desafíos a los que se enfrenta la humanidad actualmente es el problema del calentamiento global y el cambio climático. Este suceso se debe principalmente a la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y gases fluorados) en la atmósfera siendo el dióxido de carbono (CO_2) uno de sus principales protagonistas pues contribuye aproximadamente con el 76% de las emisiones globales de estos GEI [1].

En las últimas décadas, la actividad humana ha producido un aumento progresivo del CO_2 en la atmósfera con procesos como la generación de energía a partir de combustibles fósiles que hace que el efecto invernadero se vuelva cada vez más evidente. Esto supone una enorme amenaza para la salud humana (dolor de cabeza, mareo, fatiga) y la seguridad mundial pudiéndose ver reflejado en el aumento de la temperatura media del planeta, acidificación de océanos, aumento del nivel del mar o pérdida de biodiversidad entre otros. Estas consecuencias se pueden ver también con datos objetivos proporcionados por la Agencia Internacional de la Energía, la cual afirma que la concentración de CO_2 en la atmósfera ha alcanzado los 420 ppm suponiendo un aumento del 40% con respecto a los niveles preindustriales y la temperatura superficial del planeta ha aumentado en 1,1 °C [1].

Ante esta problemática, desde la década de 1970, la descarbonización se ha destacado como una estrategia clave para mitigar el cambio climático [2] y por ello se han desarrollado diferentes fuentes de energía limpia con el objetivo de reducir las emisiones de CO_2 . Ejemplos de estas energías son las renovables (solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica), energías renovables no convencionales como la biomasa/biogás o el combustible limpio de origen renovable, el hidrógeno verde. Sin embargo, pese al desarrollo de estos sistemas energéticos de bajas emisiones, los procesos industriales tradicionales siguen siendo de vital importancia para mantener los servicios alcanzados hoy en día. En este contexto surge el Acuerdo de París de 2015, tratado internacional firmado por 195 países enmarcados en la CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) [3]. En este acuerdo los países signatarios se comprometen a reducir de manera drástica, rápida y sostenida las emisiones de GEI para limitar el calentamiento global, así pues, adoptan unas políticas encaminadas a la mitigación y adaptación al cambio climático. Para ello, entre algunos de sus objetivos, se encuentra la limitación de la temperatura global por debajo de los 2 °C y si es posible, que no supere los 1,5 °C respecto a los niveles preindustriales (1850-1900).

En este contexto surgen las tecnologías de CCUS (de sus siglas en inglés: Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono). Se trata de una tecnología con el potencial de reducir las emisiones de CO_2 a gran escala. Se considera la clave para mitigar el cambio climático y ha atraído una gran atención por parte de los gobiernos, la industria y el mundo académico en los últimos años [1].

El estudio se centra en la primera etapa del proceso CCUS, la captura, la cual presenta múltiples alternativas. De esta amplia variedad de alternativas surge la motivación del presente trabajo: el empleo de métodos MCDM (del inglés, “Multi-Criteria Decision Making”) para poder hacer una comparativa de las diferentes tecnologías de captura de dióxido de carbono y determinar cuál de ellas presenta el mejor desempeño global.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es evaluar y comparar distintas tecnologías de captura de dióxido de carbono mediante la aplicación de métodos de análisis de decisión. Para lograrlo, se irán alcanzando a lo largo de este trabajo los siguientes objetivos específicos:

- Exponer la situación actual del cambio climático a nivel global mediante datos, identificando las principales fuentes de emisión, los países más contaminantes y los compromisos y acuerdos internacionales existentes para su mitigación.
- Estudiar las principales tecnologías de captura de CO₂, identificando sus principios de funcionamiento, ventajas y limitaciones, para posteriormente compararlas mediante métodos MCDM.
- Definir los métodos de análisis de decisión multicriterio y escoger aquellos que mejor se adapten para comparar las tecnologías seleccionadas y establecer una jerarquización objetiva entre ellas.
- Seleccionar y definir los criterios que se van a tener en cuenta a la hora de aplicar los métodos de decisión multicriterio. Estos criterios pueden ser técnicos, económicos o ambientales y su elección es de vital importancia pues supone el pilar fundamental del estudio multicriterio.
- Analizar los resultados obtenidos y extraer conclusiones que permitan valorar el potencial de las tecnologías de captura de CO₂ como herramienta de mitigación del cambio climático.
- Dar a conocer la tecnología emergente DAC (del inglés, Direct Air Capture), una nueva medida que complementa a las actuales cuyo papel en la lucha contra el cambio climático puede ser relevante y cuyo desarrollo está acelerando en los últimos años pudiendo ser objeto de otro análisis multicriterio en el futuro.

1.3 Estructura del proyecto

Con el fin de facilitar la comprensión del trabajo y ofrecer una visión estructurada de los contenidos que se desarrollan, el estudio se ha organizado en los siguientes capítulos:

Introducción y objetivos: Este capítulo inicial tiene como finalidad exponer el contexto y las motivaciones que han dado lugar a la realización de este Trabajo de Fin de Grado, así como definir los objetivos que se pretenden alcanzar. Asimismo, se presenta la organización del documento, describiendo brevemente el contenido de cada uno de los capítulos, con el objetivo de guiar al lector y proporcionar una visión global del estudio.

Estado del arte: En este apartado se aborda una revisión del estado actual sobre el conocimiento en materia de emisiones de dióxido de carbono y de las principales tecnologías de captura de CO₂ existentes, así como la explicación de los métodos de análisis multicriterio. De esta manera se establece la base para el posterior análisis comparativo.

Desarrollo del TFG: El contenido de este capítulo se compone de una explicación del procedimiento de los métodos de análisis multicriterio que se aplicarán para la evaluación de las tecnologías, consideradas como las distintas alternativas. También se describen los criterios elegidos, a la vez que se expone una reseña del comportamiento de cada alternativa respecto a cada criterio con el fin otorgarles una puntuación relativa, que será de aplicación para elaborar el análisis de decisión.

Resultados y discusión: En esta sección se expone la aplicación del análisis multicriterio y se presentan los resultados obtenidos, así como se comprueba la robustez de estos gracias a la elaboración de un análisis de sensibilidad, donde se modifican ligeramente la ponderación de los criterios. Posteriormente se procede a la discusión de dichos resultados justificando el puesto que ha obtenido cada tecnología.

Nuevas estrategias de captura: Antes de finalizar con las conclusiones, se introduce una nueva tecnología emergente cuyo desarrollo se ha acelerado en gran medida en los últimos años. Se trata de la captura de dióxido de carbono directamente del aire, y en el capítulo se habla de ella con una descripción de su funcionamiento, los tipos de tecnología existentes, su estado actual y su papel complementario en el futuro junto con las tecnologías de captura convencionales.

Conclusiones y líneas futuras: El último capítulo del TFG sintetiza los principales resultados y conclusiones obtenidas a lo largo del estudio, identificando las tecnologías de captura de CO₂ que presentan un mayor potencial en función del análisis realizado. Finalmente, se proponen posibles líneas de investigación futura, ideas que han ido surgiendo mientras se desarrollaba el presente estudio y que pueden ser llevadas a cabo en futuros trabajos.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Problemática de las emisiones de CO₂

2.1.1 El CO₂ y su papel en el cambio climático

El CO₂ es considerado el principal gas de efecto invernadero de origen antropogénico debido a dos importantes razones: su elevada contribución a las emisiones globales y su prolongada permanencia en la atmósfera.

Si bien el CO₂ forma parte del ciclo natural del carbono, las actividades humanas principalmente la combustión de combustibles fósiles, los procesos industriales y los cambios en el uso del suelo han alterado de forma significativa el equilibrio natural de dicho ciclo desde el inicio de la Revolución Industrial [4]. Las emisiones globales de CO₂ han mostrado una tendencia claramente creciente en las últimas décadas. A pesar de descensos puntuales como se observa en la Figura 2-1, asociados a crisis económicas o a la pandemia de COVID-19, los valores globales se han recuperado rápidamente, alcanzando máximos históricos en años recientes [4]. Esta tendencia refleja la fuerte dependencia estructural del sistema energético e industrial mundial de los combustibles fósiles.

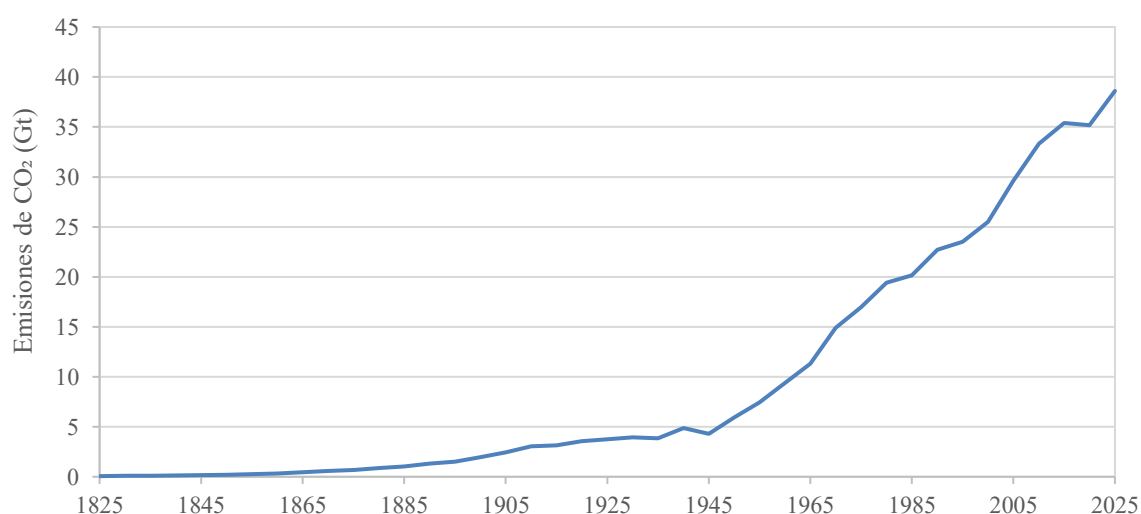


Figura 2-1 Emisiones de CO₂ a la atmósfera en los últimos años (datos recogidos en [4])

Las mediciones instrumentales muestran que la concentración atmosférica de CO₂ ha pasado de valores preindustriales cercanos a 280 ppm a superar las 420 ppm en los últimos años, alcanzando niveles sin precedentes en al menos los últimos 800 000 años [5]. Este dato impulsa a señalar que el CO₂ en la

atmósfera no es un fenómeno nuevo, siempre ha existido gracias a procesos naturales como la respiración biológica, la actividad volcánica, la descomposición de la materia orgánica y los intercambios con océanos y biosfera [5].

Una de las características más relevantes del CO₂ desde el punto de vista climático es su carácter acumulativo. A diferencia de otros contaminantes atmosféricos de vida corta como el metano (CH₄), el dióxido de carbono emitido puede llegar a permanecer en la atmósfera durante siglos, lo que implica que los impactos climáticos actuales son el resultado de la acumulación histórica de emisiones. Esto convierte al CO₂ en un GEI especialmente problemático, ya que incluso escenarios de reducción drástica de emisiones no conducen a una disminución inmediata de su concentración atmosférica [6]. En la Figura 2-2 se observa como el CO₂ representa prácticamente la totalidad de la concentración y el resto de los gases tienen valores despreciables. También se puede observar como la capacidad de acumulación del dióxido de carbono hace que cada año aumente en una gran cantidad de partes por millón.

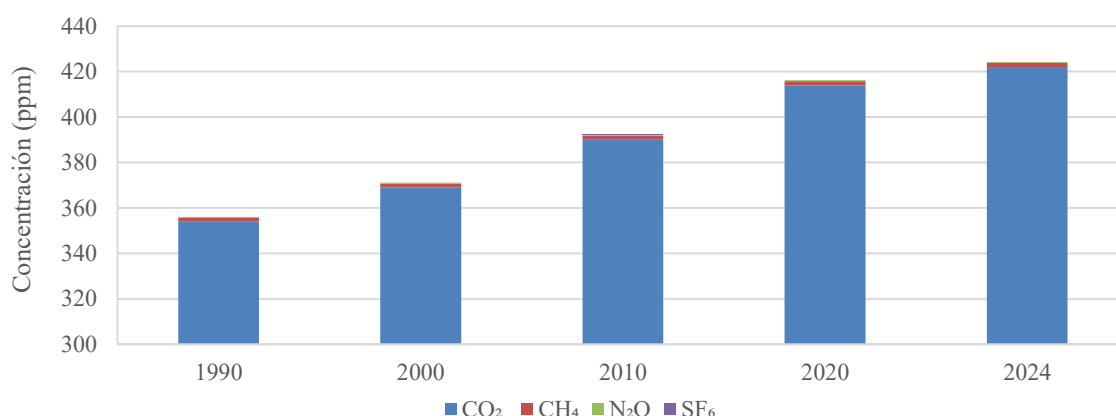


Figura 2-2 Concentración (ppm) de los GEI en la atmósfera (datos recogidos en [7])

En condiciones naturales, el CO₂ desempeña un papel esencial en la regulación de la temperatura terrestre mediante el efecto invernadero. Absorbe parte de la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre, reduciendo la disipación de calor hacia el espacio. Sin embargo, el incremento sostenido de su concentración atmosférica ha intensificado este fenómeno, provocando un aumento progresivo de la temperatura media global a lo largo de los años (Figura 2-3) y por tanto generando un desequilibrio energético en el sistema climático. Este desequilibrio constituye la base física del cambio climático y se manifiesta en fenómenos como el aumento de la temperatura media global, la alteración de los patrones de precipitación y la mayor frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos [7].

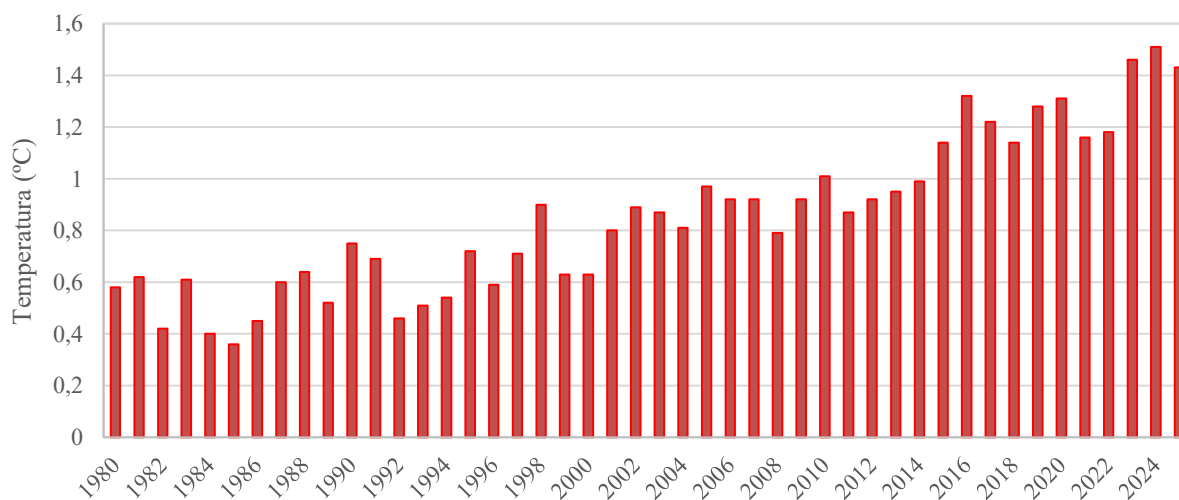


Figura 2-3 Aumento de la temperatura media global en los últimos años (datos recogidos en [7])

2.1.2 Principales fuentes de emisión de CO₂

Las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera proceden tanto de fuentes naturales como antropogénicas. No obstante, en el contexto actual, el incremento sostenido de la concentración atmosférica de CO₂ está dominado por las emisiones de origen humano que son las que han dado lugar a la problemática del calentamiento global. Las emisiones preindustriales, aquellas cuya fuente es la propia naturaleza han quedado totalmente desplazadas a un segundo plano, siendo objeto de estudio las emisiones procedentes de los siguientes sectores. En la Figura 2-4 se aprecia el porcentaje de las principales fuentes de emisión de CO₂ procedentes de la actividad humana [8].

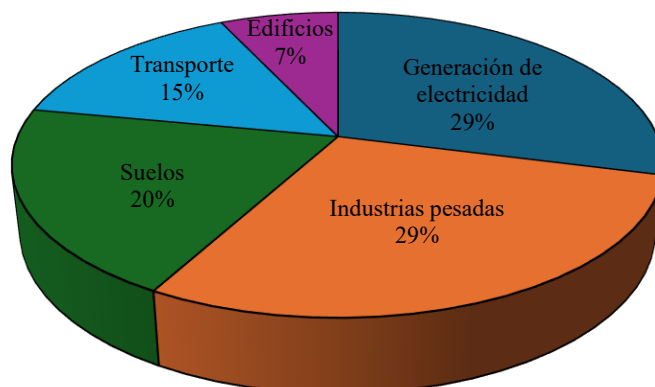


Figura 2-4 Fuentes de emisión de CO₂ (datos recogidos en [8])

2.1.2.1 Generación de electricidad y producción de energía

La generación de electricidad y energía partiendo de combustibles fósiles es la mayor fuente de emisiones de CO₂ a nivel global. La combustión de carbón, gas natural y, en menor medida, derivados del petróleo en centrales térmicas libera grandes cantidades de CO₂ como resultado directo de la oxidación del carbono contenido en el combustible. A pesar del crecimiento de las energías renovables, la generación eléctrica fósil sigue teniendo un peso significativo en muchos sistemas energéticos. En España hay más de 80 instalaciones de generación eléctrica fósil que emiten CO₂ [9], un ejemplo de estas se puede ver en la Figura 2-5.



Figura 2-5 Central térmica de Soto de Ribera [9]

2.1.2.2 Industria pesada y procesos industriales

Muchos procesos industriales emiten CO₂ a través del consumo de combustibles fósiles. Varios procesos también producen emisiones a través de reacciones químicas sin combustiones, por ejemplo: la producción y el consumo de productos minerales como el cemento, la producción de metales como el hierro y el acero y la producción de sustancias químicas [10]. Un caso particular es la producción de clínker mediante la industria cementera la cual genera emisiones directas de CO₂ asociadas a la descarbonatación de la caliza.

2.1.2.3 Transporte

La combustión de combustibles fósiles como la gasolina y el diésel para transportar personas y mercancías tanto en vehículos de carretera (el más contaminante), avión, transporte marítimo y ferrocarril.

Esta combustión es una de las principales fuentes de emisión de CO₂. Aunque gracias al desarrollo de nuevas tecnologías han surgido nuevas formas de propulsar estos vehículos como el gran avance en el sector automovilístico con los coches eléctricos, que, debido al auge de políticas medioambientales estrictas, se está motivando al comprador a decantarse por esta opción. Las ventas de vehículos eléctricos (vehículos eléctricos de batería y vehículos eléctricos híbridos enchufables) se han disparado desde 2017 y se han triplicado en 2020, cuando comenzaron a aplicarse los actuales objetivos de CO₂ [11]. Este cambio en la concienciación medioambiental se refleja en el éxito comercial de vehículos eficientes como el Toyota Corolla (Figura 2-6), un coche híbrido que se ha convertido en el coche más vendido en los últimos años [12].



Figura 2-6. Toyota Corolla

2.1.2.4 Uso de los suelos

Otra fuente antropogénica de emisiones de CO₂ es causada por el uso de los suelos, en especial los bosques y campos. Las plantas y árboles que anteriormente han empleado el CO₂ para realizar la fotosíntesis ahora lo liberan, pues su equilibrio natural de carbono ha sido alterado por actividades humanas como la deforestación, el cambio de uso del suelo, el manejo forestal inadecuado o determinadas prácticas agrícolas [13].

La propia naturaleza hace que los ecosistemas forestales y agrícolas tiendan a mantener un balance aproximado entre la fijación y la liberación de carbono; sin embargo, la conversión de bosques a otros usos y la perturbación física del suelo aceleran la mineralización de la materia orgánica, liberando a la atmósfera carbono previamente almacenado durante largos periodos de tiempo.

2.1.3 Compromisos internacionales contra el cambio climático

El problema del cambio climático es tangible mundialmente, se puede decir que todos los países son actores en la emisión de GEI lo que ha llevado a una respuesta coordinada por parte de la comunidad internacional a finales del siglo XX.

Así, en 1992 se celebró en Río de Janeiro la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) cuyo objetivo principal es la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera. A pesar de que no se presentaron objetivos cuantitativos en cuanto a reducción de emisiones, sentó las bases para el desarrollo de acuerdos posteriores, creando el marco institucional de la COP (Conferencia de las Partes), es decir, la reunión anual de los 197 países que ratificaron la convención de 1992 (Figura 2-7), adquiriendo por ello un carácter universal [14].



Figura 2-7 CMNUCC de Río de Janeiro de 1992 [15]

La primera COP celebrada fue la de Berlín en 1995, y desde entonces han tenido lugar 30 convenciones sobre el cambio climático en distintas ciudades del mundo, como Madrid en 2019. En ellas se toman decisiones como:

- Adoptar nuevos acuerdos internacionales.
- Establecer objetivos climáticos y marcos temporales.
- Definir mecanismos de seguimiento y transparencia.
- Negociar financiación climática y transferencia tecnológica.
- Revisar el progreso de los compromisos existentes.

Sin embargo, hay dos COP que han destacado sobre el resto, por su relevancia jurídica y política, la COP3 donde se adoptó el Protocolo de Kioto, y la COP21 con el Acuerdo de París.

En primer lugar, el Protocolo de Kioto de 1997 fue el primer intento de imponer compromisos jurídicos de reducción de emisiones. Su objetivo más notable fue la reducción de las emisiones de GEI en un 5% entre los años 2008 y 2012 con respecto a los niveles de 1990, aunque sólo se estableció para países industrializados y de manera diferenciada. Además, se acordó la aplicación del comercio de derechos de emisiones y el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), medidas diseñadas para facilitar la reducción de CO₂ de forma económicamente eficiente. Sin embargo, la ausencia de compromisos de grandes emisores como Estados Unidos que no ratificó el acuerdo, sumado a la exclusión de países en desarrollo, limitó significativamente el alcance del Protocolo [16].

En 2015 tuvo lugar la COP21 donde se constituyó el principal marco internacional vigente en materia de lucha contra el cambio climático, el Acuerdo de París. Este acuerdo ha sido ratificado por 195 países destacando la ausencia de Irán que ocupa el puesto número 9 de países con mayor emisión de CO₂, y la retirada formal de EE. UU. y su rápida reincorporación en 2020 y 2021 respectivamente. Se estableció como objetivo central del acuerdo la limitación del incremento de la temperatura media global por debajo de 2 °C respecto a niveles preindustriales (1850-1900), y si es posible, realizar esfuerzos para no superar 1,5 °C [3].

A diferencia del protocolo de Kioto, el Acuerdo de París es aplicable a todos los países y se basa en las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC), gracias a ellas cada Estado define voluntariamente sus compromisos de reducción de emisiones siendo estas responsabilidades revisadas y reforzadas de forma periódica [3].

Los objetivos de ambos acuerdos son ambiciosos y difíciles de lograr. La temperatura del planeta ya ha superado los 1,5 °C (Figura 2-3) y aunque no haya sido de forma sostenida, se prevé que para finales de esta década se supere permanentemente [17].

El aspecto más relevante que se puede destacar de estos compromisos internacionales es el reconocimiento explícito mundial de la necesidad de alcanzar un equilibrio entre las emisiones antropogénicas y las absorciones de GEI en la segunda mitad del siglo XXI, lo que refuerza la necesidad de implementar las tecnologías de captura de CO₂.

En la Tabla 2-1 se muestra el ranking de los países más emisores de CO₂ del mundo en el año 2024 a partir de combustibles fósiles, tanto por números totales como por habitantes (donde se aprecia la influencia de pequeños países con grandes yacimientos de petróleo).

Totales		Per cápita	
Países	Emisión de CO ₂	Países	Emisión de CO ₂
China	12.289.037.000 t	Qatar	41,27 t
Estados Unidos	4.904.120.000 t	Kuwait	26,25 t
India	3.193.478.100 t	Bahrein	24,27 t
Rusia	1.780.524.400 t	Arabia Saudí	20,38 t
Japón	961.867.300 t	Emiratos Árabes Unidos	20,13 t
Indonesia	812.220.200 t	Omán	15,65 t
Irán	792.631.200 t	Australia	14,48 t
Arabia Saudí	692.133.500 t	Estados Unidos	14,20 t

Tabla 2-1 Ranking de países emisores de CO₂ en el año 2024 (datos recogidos en [18, 19])

Estos datos ponen de manifiesto la importancia de poner remedio a este problema y su repercusión global, todos los estados del mundo son partícipes de la emisión de CO₂ a la atmósfera.

2.2 Captura, transporte, utilización y almacenamiento del CO₂

La gestión de la reducción concentraciones de CO₂, está compuesta por una serie de procesos que permiten capturarlo en el punto de emisión, transportarlo hasta un lugar adecuado y destinarlo a su almacenamiento geológico permanente o a su utilización como materia prima en distintos procesos industriales (Figura 2-8). Estas tecnologías conocidas como CCUS (del inglés: Carbon Capture, Utilization and Storage) son especialmente relevantes en industrias como el cemento, la química o la generación eléctrica con combustibles fósiles, donde la eliminación total de emisiones resulta compleja [20].

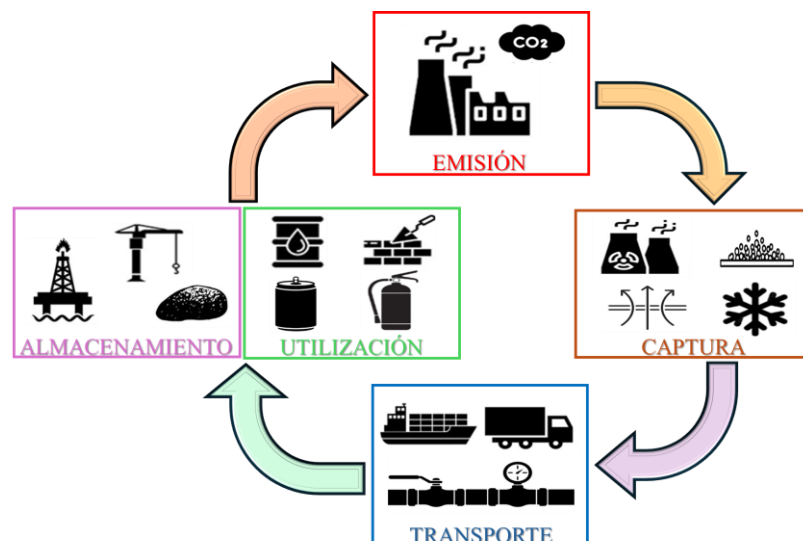


Figura 2-8 Proceso CCUS (autoría propia)

2.2.1 Captura de CO₂

La captura de CO₂ es el inicio y la etapa con mayor impacto en coste y consumo energético. Su función es separar el CO₂ de las corrientes gaseosas generadas en procesos industriales o de combustión, obteniendo una corriente concentrada adecuada para su posterior transporte y gestión [21].

Se pueden clasificar en función del momento en el que se produce la separación del CO₂, postcombustión, precombustión y oxcombustión. La captura postcombustión ha recibido especial atención debido a su potencial para ser integrada en instalaciones existentes, utilizando tecnologías como absorción con disolventes amínicos, adsorción en sólidos, separación por membranas y procesos criogénicos [21].

Las tecnologías actuales de captura pueden alcanzar eficiencias en torno al 85–95 %, aunque a costa de una penalización energética considerable. Esta penalización supone una reducción de la eficiencia global de las instalaciones de hasta un 20–30 %, lo que incrementa tanto los costes operativos como el consumo de energía primaria [20].

Puesto que este Trabajo Fin de Grado se centra en el análisis multicriterio de tecnologías de captura de CO₂, los aspectos técnicos y comparativos de estas tecnologías se desarrollan en mayor profundidad en apartados posteriores.

2.2.2 Transporte de CO₂

El transporte de CO₂ es una etapa fundamental en la cadena CCUS, conecta las fuentes emisoras con los puntos de utilización o almacenamiento. La viabilidad técnica y económica de esta etapa depende de factores como la distancia, el volumen de CO₂ transportado, la topografía y la disponibilidad de infraestructuras existentes [22].

2.2.2.1 Transporte por tuberías

El transporte por tuberías es el método más estudiado y desarrollado para grandes volúmenes de dióxido de carbono. El CO₂ se transporta normalmente en fase densa o supercrítica, a presiones superiores a 7–8 MPa, lo que permite minimizar el volumen y mejorar la estabilidad del flujo [22].

El transporte por tuberías es la opción más rentable para distancias medias y largas cuando se manejan caudales elevados, del orden de millones de toneladas de CO₂ al año. Sin embargo, su diseño debe considerar fenómenos como la corrosión, los cambios de fase, la pérdida de presión y los requisitos de seguridad [22].

2.2.2.2 Transporte marítimo

El transporte marítimo de CO₂ ha sido identificado como una alternativa flexible, especialmente adecuada para regiones costeras o para conectar múltiples emisores con un único emplazamiento de almacenamiento. En este caso, como muestra la Figura 2-9, el CO₂ se transporta generalmente en estado líquido dentro de tanques criogénicos presurizados permitiendo una capacidad en torno a las decenas de miles de toneladas, lo que permite una mayor flexibilidad en comparación con las infraestructuras fijas [23].



Figura 2-9 Buque con tanques criogénicos a bordo para transportar CO₂ [23]

Otras opciones, como el transporte por carretera o ferrocarril, se limitan a aplicaciones de pequeña escala, debido a sus elevados costes y a la limitada capacidad de transporte continuo [24].

2.2.3 Utilización de CO₂

La utilización supone volver a otorgarle una vida útil al CO₂ capturado, contribuyendo a una economía circular del carbono (Figura 2-10). Las formas de utilización varían y son muy diversas como la conversión química en combustibles sintéticos, los procesos biológicos para desarrollar fertilizantes, la mineralización o procesos físicos como refrigerantes o bebidas carbonatadas [25].

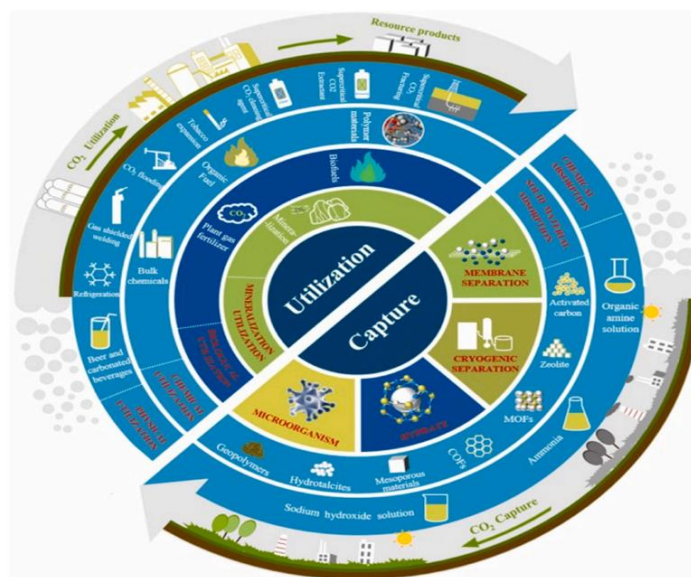


Figura 2-10 Ciclo de captura y utilización del carbono [20]

Diversos estudios señalan que la utilización del CO₂ puede aportar beneficios económicos y reducir parcialmente las emisiones netas, aunque muchas rutas de utilización implican volver a liberar este gas a la atmósfera, lo que reduce su eficacia como medida de mitigación [20].

2.2.4 Almacenamiento de CO₂

Esta fase del proceso es considerada la opción más eficaz para lograr reducciones permanentes de emisiones. Esta etapa consiste en la inyección de CO₂ en formaciones geológicas profundas donde puede permanecer confinado durante miles a millones de años, dependiendo de las características geológicas del emplazamiento [26].

2.2.4.1 Acuíferos salinos profundos

Los acuíferos salinos profundos son la opción de almacenamiento con mayor capacidad potencial. Estas formaciones están distribuidas mundialmente y permiten el almacenamiento del CO₂ gracias a diversos mecanismos de atrapamiento que se detallan a continuación [26]:

- Atrapamiento estructural: al igual que la acumulación natural del petróleo, el CO₂ tras la inyección se encuentra retenido debajo de rocas impermeables.
- Atrapamiento residual: a diferencia de la estructural, aquí el gas se inserta dentro de rocas porosas quedando después inmovilizado en forma de burbuja.
- Atrapamiento por disolución: el CO₂ se disuelve en el agua salada presente en rocas, así disminuye su flotabilidad dificultando que escape.
- Atrapamiento por mineralización: gracias a la reacción de CO₂ con minerales de la roca hospedadora se forman carbonatos sólidos garantizando un almacenamiento de millones de años.

2.2.4.2 Yacimientos de petróleo y gas agotados

Se aprovechan las infraestructuras tanto terrestres como marítimas de los yacimientos agotados de petróleo y gas para almacenar CO₂ en su lugar [26]. Un ejemplo es el antiguo yacimiento petrolífero de Nini (Figura 2-11), situado en el Mar del Norte, que ha sido reconvertido en el primer almacén submarino de CO₂ plenamente operativo de la UE, liderado por el grupo INEOS. Esta iniciativa tiene el objetivo de almacenar hasta 8 millones de toneladas anuales para 2030, transformando la infraestructura fósil en un "cementerio" de carbono [27].

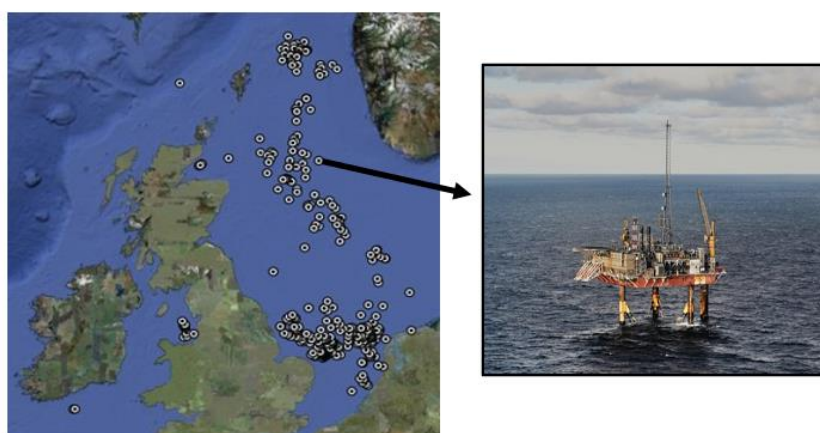


Figura 2-11 Petrolíferas en el Mar del Norte junto al yacimiento agotado Nini [27]

2.2.4.3 Capas de carbón no explotables y mineralización

Las capas de carbón no explotables permiten el almacenamiento del CO₂ mediante procesos de adsorción, mientras que la mineralización transforma el CO₂ en carbonatos estables mediante reacciones

con rocas ricas en calcio o magnesio. Un ejemplo de estas rocas es el basalto, una de las rocas volcánicas más abundantes en la Tierra, que como se muestra en la Figura 2-12 son una manera eficaz de almacenar CO_2 [28]. Estas opciones presentan un alto grado de estabilidad aunque su aplicación a gran escala se ve limitada por factores técnicos y económicos [26].

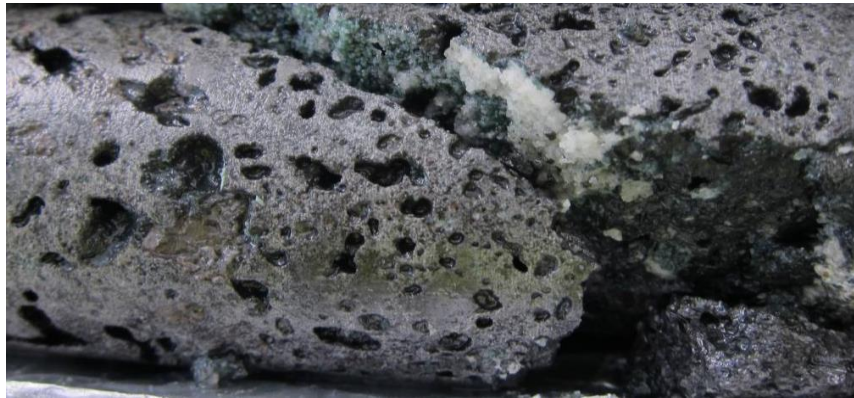


Figura 2-12 Basalto con CO_2 inyectado mediante mineralización de carbonatos [28]

Esta revisión conjunta de la cadena CCUS permite tener una visión global del proceso a los que se somete el CO_2 . En los siguientes capítulos se procederá al análisis de uno de los elementos más relevantes, las tecnologías de captura de CO_2 , elemento del CCUS que supone el objeto de estudio de este Trabajo de Fin de Grado.

2.3 Estrategias de captura de CO_2

Las tecnologías de captura de CO_2 puede ser llevadas a cabo según distintos procesos que dependen de cuándo y cómo se realiza la combustión de los gases o fósiles. Estas estrategias se conocen como procesos de postcombustión, precombustión y oxidación. Esta clasificación constituye la base sobre la que se desarrollan la mayoría de los sistemas de captura actuales [29].

2.3.1 Postcombustión

La captura de CO_2 en postcombustión Figura 2-13 se lleva a cabo una vez finalizado la quema de combustible actuando directamente sobre los gases de escape generados. El combustible se quema de manera convencional en presencia de aire, produciendo una corriente gaseosa compuesta mayoritariamente por nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y una fracción relativamente baja de CO_2 (4 - 14 %). Tras la combustión, el gas se conduce a una etapa de separación en la que el CO_2 es extraído mediante distintas tecnologías [29]. La principal característica de esta estrategia es que opera a presiones cercanas a la atmosférica y con bajas concentraciones de CO_2 , lo que condiciona el tipo de tecnologías empleadas y ha impulsado el desarrollo de métodos altamente selectivos para su captura [30].



Figura 2-13 Proceso de postcombustión (autoría propia, basado en [31])

2.3.2 Precombustión

La captura siguiendo el proceso de precombustión (Figura 2-14) se basa en la separación del CO₂ antes de que tenga lugar la combustión, transformando previamente el combustible en un gas intermedio. En este proceso, el combustible sólido o gaseoso se somete a una etapa de gasificación o reformado, reaccionando con vapor de agua y, en algunos casos, oxígeno, para producir un gas compuesto principalmente por monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂). Posteriormente, el CO se convierte en CO₂ mediante la reacción de desplazamiento agua-gas (WGS, Water Gas Shift), generando una corriente rica en CO₂ y otra en hidrógeno. La separación del CO₂ se realiza en esta etapa intermedia, generalmente a presiones elevadas y con concentraciones superiores a las de postcombustión y mientras el hidrógeno es utilizado como combustible [32].

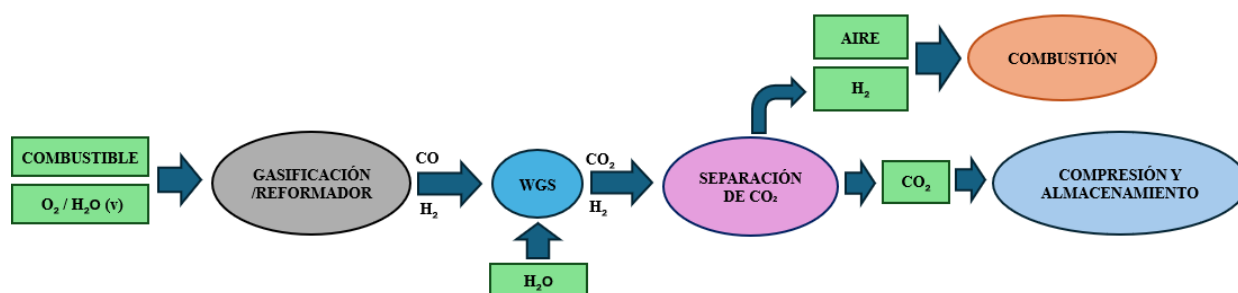


Figura 2-14 Proceso de precombustión (autoría propia, basado en [31])

2.3.3 Oxicombustión

El proceso de oxicombustión (Figura 2-15) consiste en la combustión en una atmósfera compuesta casi exclusivamente por oxígeno, en lugar de aire. Para ello, el oxígeno es previamente separado del aire mediante una unidad específica, habitualmente de tipo criogénico, y alimentado a la cámara de combustión. Al eliminar la presencia de nitrógeno, los gases de escape resultantes están formados esencialmente por dióxido de carbono y vapor de agua, lo que permite obtener una corriente de CO₂ de elevada pureza tras la condensación del agua [29]. Este proceso se desarrolla a temperaturas de combustión elevadas, por lo que suele ser necesario recircular parte de los gases de salida para controlar el régimen térmico del sistema [31].

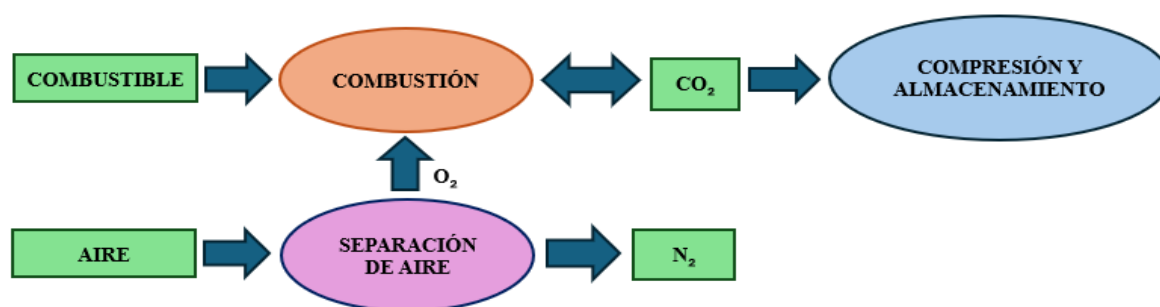


Figura 2-15 Proceso de oxicombustión (autoría propia, basado en [31])

A pesar de que las estrategias de captura en precombustión y oxicombustión presentan ventajas específicas en determinados criterios como la concentración de CO₂, ambas requieren modificaciones sustanciales del sistema energético y se asocian principalmente a nuevas instalaciones o proyectos. Por el contrario, la captura postcombustión destaca por su elevada versatilidad y por su compatibilidad con infraestructuras existentes, lo que ha favorecido su mayor desarrollo y aplicación a escala industrial [29].

La Tabla 2-2 resume estas tres estrategias comentadas en función de diversos criterios de forma cualitativa, facilitando una rápida comparación entre ellas.

Criterios	Postcombustión	Precombustión	Oxicombustión
Momento de captura	Tras la combustión	Antes de la combustión	Durante la combustión
Concentración de CO ₂	Baja	Media	Alta
Presión de operación	Baja	Alta	Baja
Complejidad del sistema	Media	Alta	Alta
Madurez tecnológica	Muy alta	Muy baja	Baja
Implantación industrial	Comercial	Limitada	Demostración
Consumo energético	Alto	Medio	Alto

Tabla 2-2 Comparación entre las estrategias de captura de CO₂ (basado en [30, 33])

Puesto que el objetivo de este trabajo no es realizar un análisis comparativo entre estrategias de captura, sino estudiar las tecnologías de captura de CO₂, el presente estudio se centra exclusivamente en aquellas tecnologías aplicables a procesos de postcombustión ya que este tipo de estrategia presenta actualmente el mayor grado de madurez tecnológica y el nivel más alto de implantación industrial. Esta elección permite analizar de manera detallada los principales métodos actuales abordando sus fundamentos, ventajas y limitaciones.

A partir de este punto, se desarrollan de forma individual las principales tecnologías de captura de CO₂ empleadas en postcombustión, concretamente la absorción, la adsorción, la separación mediante membranas y la separación criogénica, que constituyen el núcleo del análisis técnico del presente capítulo.

2.4 Tecnologías de captura de CO₂ en postcombustión

2.4.1 Absorción

La absorción es una de las tecnologías más empleadas para la captura de CO₂ en procesos de postcombustión y se basa en la transferencia del dióxido de carbono desde una corriente gaseosa hacia una fase líquida. En este método, el gas de combustión entra en contacto con un disolvente capaz de retener selectivamente el CO₂, mientras que el resto de los componentes del gas atraviesan el sistema sin ser capturados [29].

El proceso de absorción se lleva a cabo habitualmente en un sistema formado por una columna de absorción y una columna de regeneración [29]. En la primera, los gases de combustión, previamente enfriados, se ponen en contacto con el disolvente en contracorriente, permitiendo la transferencia del CO₂ a la fase líquida. El disolvente cargado se conduce posteriormente a la columna de regeneración, donde mediante el aporte de calor se libera el CO₂ capturado y se recupera el disolvente, que es recirculado al sistema [33].

Entre las principales ventajas de la absorción destacan su alto grado de madurez tecnológica y su capacidad para operar eficazmente en corrientes gaseosas con bajas concentraciones de CO₂. No obstante, el comportamiento del proceso depende en gran medida del tipo de disolvente empleado. Existen dos tipos: la absorción física y la absorción química, que se diferencian en el mecanismo de captura del CO₂ y en el tipo de disolventes y las condiciones necesarias para su regeneración [33].

2.4.1.1 Absorción física

La absorción física de CO₂ consiste en la disolución del CO₂ en un disolvente líquido sin que tenga lugar una reacción química, siendo el gas retenido mediante interacciones físicas débiles. El CO₂ se disuelve de acuerdo con la ley de Henry, por lo que su captación se ve favorecida por altas presiones

parciales y bajas temperaturas [30]. Por este motivo, la absorción física resulta especialmente adecuada para corrientes con altas concentraciones y presiones de CO₂, por lo que su aplicación en postcombustión es limitada en comparación con precombustión.

El proceso es similar al explicado para la absorción general. Se desarrolla en una columna de absorción donde el gas entra en contacto con el disolvente, seguido de una etapa de regeneración en la que el CO₂ es liberado principalmente mediante una reducción de la presión y, en menor medida, un aumento de la temperatura. Al no existir enlaces químicos entre el CO₂ y el solvente, la regeneración requiere un aporte energético relativamente reducido [29].

Los tipos de disolventes comerciales más utilizados son el selexol el rectisol, el flúor y el plurisol. Como se puede observar en la Tabla 2-3 las condiciones de presión de estos disolventes son valores alejados de los óptimos de la postcombustión (presiones cercanas a la atmosférica) por lo que la eficiencia de este tipo de absorción disminuye de forma significativa, lo que ha limitado su implantación frente a la absorción química [31].

Disolventes comerciales	Tipo de disolvente	Temperatura	Presión
Rectisol	Metanol	-10 °C	> 2MPa
Plurisol	n-metil 2 pirrolidina	-20 °C	> 2MPa
Selexol	Éter dimetílico de polietilenglicol	-40 °C	2-3 MPa
Flúor	Carbonato de propileno	-25 °C	3,1-6,9 MPa

Tabla 2-3 Disolventes comerciales más comunes en la absorción física (basado en [32])

2.4.1.2 Absorción química

La absorción química se desarrolla mediante una reacción química reversible entre el CO₂ y un disolvente químicamente activo (generalmente una solución acuosa de aminas) que permite retener el gas de forma selectiva [31].

Gracias a su alta eficacia en corrientes gaseosas, opera con bajas concentraciones de CO₂ y su capacidad de operar a presiones cercanas a la atmosférica la convierte en una de las tecnologías de referencia. Tiene una gran implantación en instalaciones industriales existentes y se ha convertido en la opción más estudiada y desarrollada [31].

Sigue el esquema general del proceso de absorción (Figura 2-16). Los gases de combustión, tras ser enfriados y acondicionados, se introducen en una columna de absorción donde entran en contacto con el disolvente a contracorriente. Es en ese momento donde el CO₂ reacciona químicamente con las aminas presentes en el disolvente, formándose especies intermedias como carbamatos o bicarbonatos (dependiendo del tipo de amina y de las condiciones de operación). El solvente cargado se conduce posteriormente a una columna de regeneración, donde mediante el aporte de calor se rompen los enlaces químicos formados, liberando el CO₂ capturado y permitiendo la reutilización del disolvente en un ciclo cerrado [34].

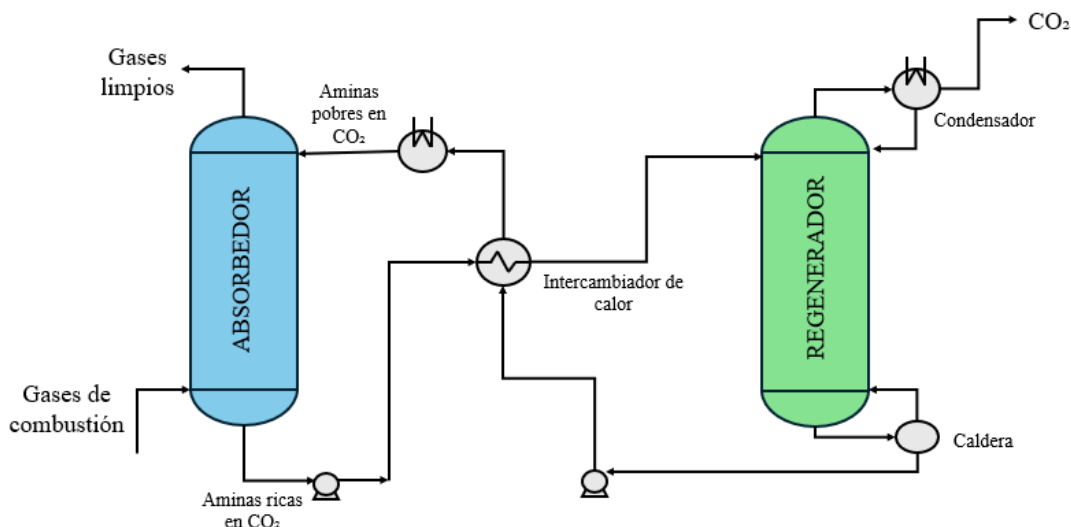


Figura 2-16 Esquema general del proceso de absorción química (autoría propia)

La absorción química se lleva a cabo a presiones próximas a la atmosférica, con temperaturas moderadas en la etapa de absorción (40-60 °C), mientras que la regeneración del disolvente requiere temperaturas más elevadas (100–130 °C). Es en esta regeneración donde ocurre la mayor penalización energética, un 70% de los costes del proceso, siendo la principal fuente de consumo energético [34].

Los disolventes más empleados son las alcanolaminas, entre las que destacan la monoetanolamina (MEA), la dietanolamina (DEA) y la metildietanolamina (MDEA). Estas aminas favorecen la formación de carbamatos en el caso de MEA y DEA, mientras que la MDEA supone la formación de bicarbonatos [32].

La absorción química presenta como principal ventaja su alto grado de madurez tecnológica, gracias a la amplia experiencia operativa acumulada. Sin embargo, su limitación más relevante, es el elevado consumo térmico para la regeneración del solvente, así como fenómenos de corrosión y degradación a largo plazo, que constituyen actualmente uno de los principales focos de investigación en el ámbito de la captura de CO₂ [34].

2.4.2 Adsorción

La adsorción se basa en la retención del CO₂ sobre la superficie de un material sólido, denominado adsorbente. En la Figura 2-17 se aprecia la principal diferencia con la absorción, y es que en esta tecnología el CO₂ no es disuelto en un líquido, sino que queda fijado en los poros del sólido. Otro aspecto positivo a destacar con respecto a la absorción es que esta tecnología no requiere un elevado consumo energético asociado a la regeneración del material [30].

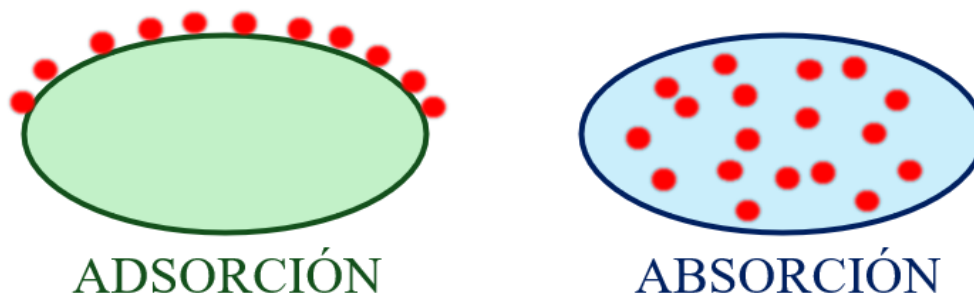


Figura 2-17 Diferencia entre adsorción y absorción (autoría propia)

El proceso de adsorción se lleva a cabo generalmente en lechos fijos o columnas de adsorción, a través de los cuales se hace pasar la corriente gaseosa que contiene CO₂. Durante la etapa de captura, el CO₂ se fija sobre el adsorbente mientras el resto de los componentes del gas atraviesan el sistema [30].

En función del tipo de interacción entre el CO₂ y la superficie del adsorbente, el proceso de adsorción puede clasificarse en fisisorción o quimisorción.

- **La fisisorción** se basa en interacciones débiles de tipo Van der Waals, caracterizándose por una baja energía de enlace y una elevada reversibilidad del proceso. Este mecanismo es especialmente favorable para aplicaciones en las que se requiere una regeneración frecuente del material con un consumo energético reducido [35].
- **La quimisorción** implica la formación de enlaces químicos entre el CO₂ y grupos activos presentes en la superficie del adsorbente, como aminas. Presenta una mayor selectividad y capacidad de captura aunque suele requerir mayores aportes energéticos para la regeneración del material debido a la mayor estabilidad del enlace formado [35].

Una vez saturado el material, el adsorbente se regenera mediante cambios en las condiciones de operación, mediante una reducción de la presión (Pressure Swing Adsorption, PSA) o un aumento de la temperatura (Temperature Swing Adsorption, TSA), liberándose el CO₂ retenido y permitiendo la reutilización del sólido en ciclos sucesivos [33].

Los materiales adsorbentes más estudiados para la captura de CO₂ son carbones activados, zeolitas, materiales mesoporosos, y estructuras metal-orgánicas (MOFs). Todos ellos a excepción de los MOFs atraen al CO₂ mediante fisisorción [33]. La Tabla 2-4 presenta las propiedades diferenciadas en cuestión de capacidad de adsorción, selectividad frente a otros gases y estabilidad frente a la humedad.

Adsorbente	Capacidad de adsorción	Selectividad frente a otros gases	Estabilidad frente a humedad
Carbones activados	Media	Media	Alta
Zeolitas	Alta	Alta	Baja
Materiales mesoporosos	Media	Media	Media
MOFs	Alta	Alta	Baja

Tabla 2-4 Cualidades de adsorbentes, basado en [30, 36]

En términos generales, la adsorción presenta como principales ventajas la ausencia de disolventes líquidos, la menor corrosión de los equipos y menor consumo energético en la etapa de regeneración. No obstante, esta tecnología se enfrenta a limitaciones importantes, como la sensibilidad del adsorbente a la humedad, la pérdida de capacidad tras ciclos repetidos y un nivel de desarrollo tecnológico inferior, lo que ha limitado su implantación a gran escala [33].

2.4.3 Separación mediante membranas

Esta tecnología se basa en la separación selectiva del gas a través de un material semipermeable, permitiendo el paso preferente del CO₂. Existen dos tipos de membranas: las membranas de separación y las membranas de absorción [33]. Sobre el funcionamiento del segundo tipo, este es parecido al de los procesos de absorción por lo que queda fuera del foco principal de este estudio.

Las membranas de separación de gases pueden dividirse en tres categorías: membranas inorgánicas, membranas de polímeros orgánicos y membranas de matriz mixta. La selectividad y la permeabilidad variará según el tipo de membrana [33].

Las membranas más utilizadas hoy en día son las poliméricas, aunque su permeabilidad con alta selectividad es generalmente baja. Para resolver este problema, se comenzó a estudiar las membranas de matriz mixta las cuales han causado la investigación de la influencia de diferentes rellenos en las membranas compuestas. La membrana de matriz mixta puede estar compuesta por polieter bloque amida (PEBA), polietilenglicol (PEG) y zeolita nano-X, entre otros. Su permeabilidad y selectividad al CO_2 aumentan con el aumento de la presión de alimentación o la carga de estos compuestos. Además, algunos estudios han demostrado que la adición de MOF puede mejorar el rendimiento de las membranas de matriz mixta en la separación de CO_2 y CH_4 [33].

Sin embargo, aún existen retos en su preparación, como la escasa compatibilidad y los defectos en la matriz de la membrana. En el futuro, la comercialización de la tecnología de separación por membranas puede acelerarse reforzando la investigación sobre membranas de matriz mixta [33].

En el esquema mostrado en la Figura 2-18, se muestra el funcionamiento de las membranas. El CO_2 es separado por un mecanismo físico de difusión selectiva, impulsado por un gradiente de presión parcial, sin que tengan lugar reacciones químicas ni cambios de fase [33].

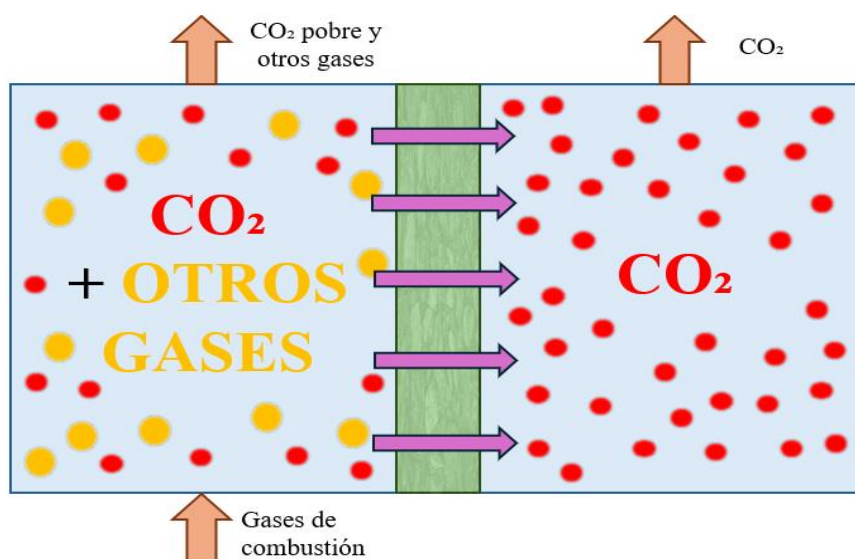


Figura 2-18 Esquema de la membrana de separación de gases (autoría propia)

Las membranas están limitadas por la pérdida de rendimiento con el tiempo causada por la acumulación de suciedad. A pesar de ello, y aunque no ha alcanzado aún un alto nivel de madurez, esta tecnología presenta ventajas como su diseño compacto y simplicidad de funcionamiento, así como la ausencia de disolventes líquidos y un menor riesgo de corrosión [36].

2.4.4 Criogenización

La criogenización se basa en la separación física mediante enfriamiento de la corriente gaseosa hasta temperaturas muy bajas ($< -50\text{ }^{\circ}\text{C}$) para solidificar o condensar el CO_2 y así separarlo del resto de gases. Se aprovechan las diferencias termodinámicas del CO_2 frente a otros componentes del gas y permite obtener corrientes de CO_2 de alta pureza sin el empleo de disolventes químicos [37].

La Figura 2-19 muestra el diagrama de fases del CO_2 , en el que se identifican las regiones de coexistencia sólido, líquido y gaseoso en función de la presión y la temperatura. Este diagrama permite comprender que, mediante una reducción adecuada de la temperatura y/o un aumento de la presión, el CO_2 puede separarse del resto de los componentes del gas al cambiar de fase [38].

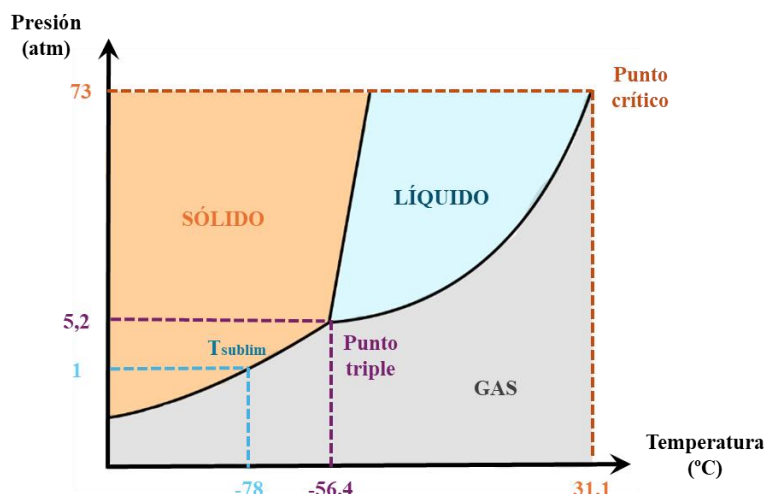


Figura 2-19 Diagrama de fases del CO₂ (autoría propia, datos recogidos en [38])

Estos sistemas criogénicos pueden operar mediante licuefacción o solidificación del CO₂, en función de la presión y temperatura de operación. En configuraciones avanzadas, el CO₂ puede separarse en forma sólida, mejorando la eficiencia del proceso. No obstante, solidificar el CO₂ hace necesario que se preste especial atención en la gestión térmica, para evitar la formación de hielo y por tanto la obstrucción de equipos. Es por ello por lo que la investigación reciente se ha centrado en el desarrollo de configuraciones híbridas, en las que se combina la criogenización con etapas previas de compresión. De esta manera se reduce el consumo energético [37].

Además de la elevada pureza del CO₂ obtenido, una de las principales ventajas de la criogenización es que se trata de un proceso puramente físico, en el que no se produce degradación de materiales ni generación de subproductos. Esto permite obtener corrientes de CO₂ directamente aptas para su transporte o almacenamiento, sin ser necesario etapas adicionales de purificación [37].

A pesar de estas grandes ventajas, la aplicación de la criogenización en procesos de captura post-combustión es limitada debido al elevado coste asociado a la refrigeración ya que los gases se encuentran a elevadas temperaturas [37].

Esta tecnología puede llegar a ser una opción prometedora en el caso de que se disponga de energía eléctrica de bajo coste o excedentes energéticos, o en aplicaciones específicas donde la alta pureza del CO₂ sea un requisito. En este contexto, la criogenización se considera actualmente una tecnología emergente, con un importante potencial de desarrollo, pero aún lejos de una implantación industrial generalizada en la captura de CO₂ [37].

2.5 Métodos de decisión multicriterio

Tomar decisiones en el ámbito de ingeniería conlleva la evaluación simultánea de diversos criterios, que frecuentemente no están relacionados entre sí. La decisión de una alternativa basada en un único objetivo resulta insuficiente, ya que una opción puede ser favorable desde un punto de vista técnico, pero desfavorable en términos económicos, ambientales o de seguridad. Para abordar esta complejidad surgen los métodos de decisión multicriterio (Multicriteria Decision Making, MCDM), cuyo objetivo no es identificar una solución óptima absoluta, sino aquella que ofrece el mejor compromiso global entre los criterios considerados [39].

Los métodos multicriterio permiten integrar información cuantitativa y cualitativa, así como las preferencias del analista, de una manera formal y estructurada [39]. Cada vez son más los estudios de diversos ámbitos que hacen uso de ella. Ejemplos son la elección de técnicas de almacenamiento de hidrógeno [40], gestión de la biodiversidad [41] u orientación de destinos turísticos [42], entre otros.

La consolidación del análisis multicriterio se produce con la celebración en Estados Unidos de la Primera Conferencia Mundial sobre Decisión Multicriterio en 1972 y la posterior creación de una comunidad científica específica, conocida en la actualidad como la Sociedad internacional de Toma de Decisiones Multicriterio. Partiendo de ese punto de partida, el MCDM se ha ido ampliando con métodos más precisos y eficaces gracias a la incorporación de técnicas matemáticas y computacionales avanzadas. Ejemplos son la aparición del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), propuesto por Saaty en 1980, o el método TOPSIS, desarrollado por Hwang y Yoon en 1981 [43].

2.5.1 Características comunes de la decisión multicriterio

La idea principal de un problema sometido a un análisis de decisión multicriterio es la selección de la mejor alternativa entre varias opciones posibles. Para ello, se emplean criterios previamente definidos que orientan el proceso de evaluación y facilitan la selección de la mejor solución. Para una correcta interpretación del concepto de criterio es necesario distinguir una serie de elementos básicos que permiten estructurar y clarificar el problema de decisión. Estos elementos se resumen en la Tabla 2-5 [44].

Elemento	Definición	Ejemplo
Atributo	Valores objetivos que describen cada alternativa	Coste de un proyecto
Objetivo	De qué manera se quiere mejorar cierto atributo	Minimizar el coste
Nivel de aspiración	Umbral que no debe superar un atributo para ser aceptable	Coste < 5 millones de euros
Meta	Valor dentro del nivel de aspiración que se desea alcanzar	Alcanzar coste de 4 millones de euros

Tabla 2-5 Elementos del análisis de decisión

También ha de tenerse en cuenta que no siempre se tiene la misma información acerca del escenario en el que se va a realizar el estudio. De esta manera, Eduardo Pérez Gorostegui [45] diferenció tres tipos de ambientes de decisión según la información disponible por el decisor:

- Ambientes con certeza: el decisor tiene un amplio conocimiento tanto del escenario como de las alternativas posibles.
- Ambientes con riesgo: en este caso, el decisor es conocedor de las probabilidades de que ocurra cada resultado por lo que su decisión ira acorde a dichas probabilidades.
- Ambientes con incertidumbre: entorno donde es difícil evaluar las alternativas puesto que no se tiene información acerca del escenario del estudio.

2.5.2 Clasificación de los métodos de análisis multicriterio

En un primer momento, el concepto de decisión multicriterio (MCDM) englobaba el conjunto de métodos concebidos como herramientas de apoyo al proceso de toma de decisiones. No obstante, el notable y continuo desarrollo de estas metodologías ha dado lugar a un elevado número de técnicas, lo que hace necesaria su clasificación para facilitar su comprensión y correcta aplicación [46].

Hwang y Yoon en 1981 [43] propusieron una división ampliamente aceptada: los métodos de toma de decisión multiatributo (Multi-Attribute Decision Making, MADM) y los métodos de toma de decisión multiobjetivo (Multi-Objective Decision Making, MODM).

Los métodos MADM se aplican a problemas de naturaleza discreta, en los que el conjunto de alternativas está previamente definido y los decisores evalúan los criterios y su importancia relativa de manera “a priori”. Hay varios tipos de MADM, que a su vez se dividen en más métodos [43].

Los métodos MODM se emplean en problemas continuos, donde las alternativas no están predefinidas, sino que surgen como conjuntos de soluciones igualmente eficientes bajo determinadas restricciones, interviniendo los decisores en una fase a posteriori del proceso [43].

Todos estos métodos descritos se encuentran esquematizados en la Figura 2-20 para facilitar la comprensión y tener una visión global del conjunto [46].

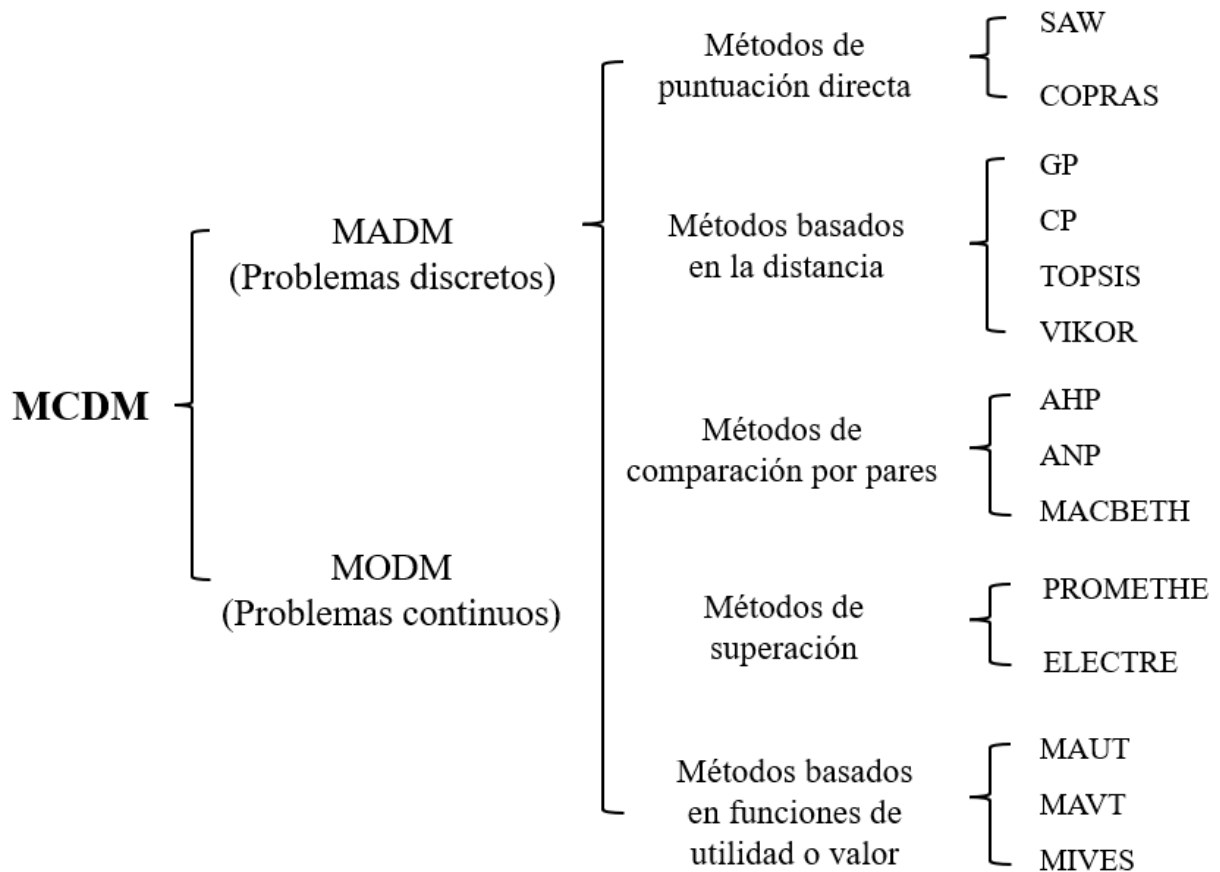


Figura 2-20 Clasificación de los métodos MCDM (autoría propia)

2.5.2.1 Métodos de puntuación directa

Son los más sencillos, ya que se basan en valorar cada alternativa mediante operaciones aritméticas simples. Métodos como SAW y COPRAS obtienen una puntuación global combinando los valores normalizados de los criterios con su peso relativo. El método SAW es el más antiguo y se utiliza cuando todos los criterios deben ser maximizados. Por su parte, COPRAS amplía este planteamiento y permite trabajar tanto con criterios de maximización como de minimización [46].

2.5.2.2 Métodos basados en la distancia

Los métodos basados en la distancia se fundamentan en medir lo lejos que se encuentra cada alternativa respecto a un punto de referencia. En el método GP, el objetivo es identificar la alternativa que cumpla un conjunto de metas previamente establecidas, sin necesidad de que exista una solución óptima. Por otro lado, el método CP busca la alternativa que se aproxime lo máximo posible a un punto ideal teórico. De estos métodos surgen otros como VIKOR y TOPSIS, que se diferencian principalmente en la forma de normalizar los criterios: mientras que VIKOR se centra en la distancia a la solución ideal, TOPSIS considera simultáneamente la distancia a la solución ideal y a la solución no ideal [46].

2.5.2.3 Métodos de comparación por pares

Los métodos de comparación por pares son muy apropiados para asignar pesos a los criterios y para evaluar aspectos subjetivos, ya que se basan en comparar las alternativas. El método AHP fue el primero en desarrollarse y sigue siendo uno de los más utilizados en problemas de toma de decisiones. A partir de este método surge ANP, que amplía el enfoque permitiendo considerar dependencias entre los criterios. Por último, MACBETH presenta una estructura similar al AHP, aunque introduce diferencias conceptuales en la forma de expresar y tratar las preferencias del decisor [46].

2.5.2.4 Métodos de superación

Se basan en establecer relaciones de preferencia entre las distintas alternativas, analizando en qué medida una opción domina a otra según los criterios considerados. Estos métodos permiten trabajar con información incompleta o imprecisa y no siempre generan una ordenación estricta, sino una clasificación basada en dichas relaciones de preferencia. PROMETHEE y ELECTRE son los métodos más representativos de este grupo [46].

2.5.2.5 Métodos basados en funciones de utilidad o valor

Los métodos basados en funciones de utilidad o valor se centran en medir el grado de satisfacción que una alternativa proporciona respecto a cada criterio. Métodos como MAUT y MAVT transforman las valoraciones de las alternativas en funciones de utilidad o valor, permitiendo comparar criterios de distinta naturaleza. Estas funciones pueden adoptar diferentes formas en función de cómo se relacione la valoración del criterio con el nivel de satisfacción del decisor. A partir de estos enfoques surge MIVES, que concreta este planteamiento mediante la definición explícita de las ecuaciones que describen las funciones de satisfacción [46].

3 DESARROLLO DEL TFG

El objetivo de este proyecto es la elección de la mejor tecnología de captura de CO₂ siguiendo el proceso de postcombustión. Para lograrlo, se analizarán las alternativas mediante unos criterios establecidos, usando como herramienta métodos de análisis de decisión multicriterio.

En este capítulo se desarrollarán los puntos más relevantes para alcanzar el objetivo del TFG. En primer lugar, se explicarán en detalle los dos métodos de análisis de decisión multicriterio que se van a emplear, AHP y VIKOR. Y, en segundo lugar, se explicarán cada uno de los siete criterios elegidos (eficiencia, consumo energético, coste, madurez tecnológica, seguridad, escalabilidad e impacto ambiental) para la evaluación de las alternativas (absorción química, adsorción, separación mediante membranas y criogenización). Junto a la explicación de los criterios se presentará una reseña del desempeño de cada una de las cuatro alternativas que serán evaluadas con el fin de asignarles una puntuación individual a cada una.

Así, quedan asentadas las bases para proceder a la aplicación de los métodos de análisis multicriterio en el cuarto capítulo.

3.1 Método AHP

3.1.1 Introducción al método AHP

El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, Analytic Hierarchy Process) fue creado por el matemático Thomas L Saaty en 1980 [47]. Este método permite seleccionar una alternativa entre varias cuando intervienen distintos criterios, fundamentándose en la descomposición del problema en niveles jerárquicos y en la comparación sistemática de los elementos mediante matrices de comparación por pares, transformando juicios cualitativos en prioridades cuantitativas [44].

Este proceso se lleva a cabo a través de varios pasos siguiendo un diagrama de flujo (Figura 3-1), gracias al cual, si falla la consistencia del método, este puede ser corregido rehaciendo pasos previos.

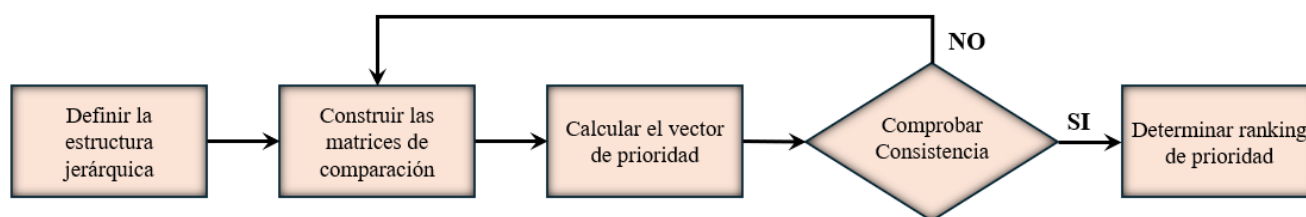


Figura 3-1 Diagrama de flujo del método AHP

Cada paso presentado en el diagrama de flujo se explica de manera individual en los siguientes subapartados.

3.1.2 Definición de la estructura jerárquica

El punto de partida del método AHP consiste en representar el problema de decisión mediante una estructura jerárquica. Esta jerarquía se organiza en tres niveles:

- **Objetivo:** finalidad última de la decisión. En este trabajo, el objetivo se corresponde con la búsqueda de la mejor tecnología de captura de CO₂.
- **Criterios:** factores que influyen en la evaluación. En este trabajo, estos factores son: eficiencia, consumo energético, coste, madurez tecnológica, seguridad, escalabilidad e impacto ambiental.
- **Alternativas:** opciones entre las que se debe elegir para lograr el objetivo. Absorción química, adsorción, separación mediante membranas y criogenización son las alternativas de este estudio.

La descomposición jerárquica permite analizar cada componente del problema de forma separada, manteniendo su relación con el objetivo global. De esta manera, como se puede observar esquemáticamente en la Figura 3-2, para llegar al objetivo se tienen en cuenta todos los criterios, y estos a su vez tienen peso para todas las alternativas del estudio.

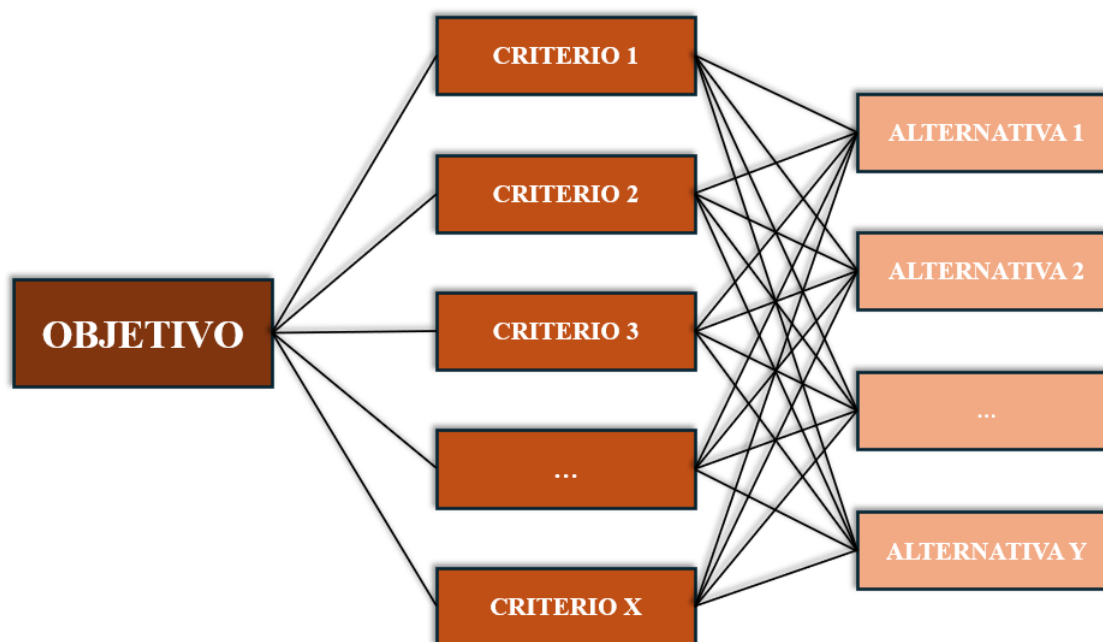


Figura 3-2 Modelo jerárquico para la toma de decisiones con el modelo AHP

En el caso de este Trabajo de Fin de Grado, el objetivo (la selección de la mejor tecnología de captura de CO₂) se alcanzará analizando siete criterios para cada una de las cuatro alternativas.

Para poder realizar con precisión las comparaciones entre los diferentes criterios y alternativas, Saaty diseñó una escala numérica que permite asignar cuantitativamente la relación cualitativa existente entre dos elementos [47]. Esta comparación pareada se realiza de forma subjetiva, aunque se ha contado con el respaldo de gran cantidad de fuentes bibliográficas que permiten escoger el valor numérico más adecuado en cada comparación.

Además, para reducir dicha subjetividad, en este trabajo se emplea una función matemática que permite determinar de forma automática la relación entre dos elementos (con los valores de la escala de Saaty) a partir de puntuaciones individuales del desempeño de cada alternativa para cada criterio. Se profundizará más en este concepto en el apartado 3.1.3.

La Tabla 3-1 muestra los valores establecidos por Saaty para ser asignados a cada alternativa según su importancia respecto a otra para llegar al objetivo.

VALOR	DEFINICIÓN	EJEMPLO
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igual al objetivo
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen un poco a un elemento frente al otro
5	Importancia grande	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un elemento frente al otro
7	Importancia muy grande	Un elemento es favorecido muy fuertemente sobre el otro. En la práctica se puede demostrar su dominio
9	Importancia extrema	La evidencia favorece en la más alta medida a un elemento frente al otro
2, 4, 6 y 8	Valores intermedios, cuando sea necesario matizar	

Tabla 3-1 Escala de comparación de Saaty (basado en [48])

Una vez establecida la estructura jerárquica, y siguiendo el diagrama de flujo de la Figura 3-1, los dos pasos siguientes (construir las matrices de comparación y calcular el vector de prioridad) se aplican inicialmente para determinar la ponderación de los criterios, y posteriormente, estos mismos pasos se emplean para evaluar las alternativas con respecto a cada criterio. De esta forma, se obtiene independientemente el peso de los criterios (W) y los correspondientes vectores de prioridad de las alternativas (V).

3.1.3 Construcción de las matrices de comparación

Para simplificar la construcción de las matrices de comparación pareada, se ha adoptado un enfoque matemático alternativo que permite asignar una puntuación individual a cada elemento y que se calcule automáticamente los valores de comparación vistos en la escala de Saaty (Tabla 3-1). En el caso de los criterios, se han ordenado de manera decreciente asignándoles una puntuación según su relevancia relativa, de manera que el criterio más importante recibe 7 puntos, mientras que el menos relevante recibe 1 punto. Por otro lado, para las alternativas se ha asignado una puntuación comprendida entre 1 y 9, que refleja su nivel de desempeño respecto al criterio bajo el cual están siendo evaluadas.

A partir de estas puntuaciones individuales, se puede hallar X, que representa el valor de la comparación entre elementos, valores vistos en la Tabla 3-1. Este valor se genera automáticamente mediante una función basada en la diferencia $A-B$, siendo A la puntuación individual de un elemento y B la puntuación de otro. De esta forma, se evita la asignación manual de valores de la escala de Saaty y se reduce la subjetividad del proceso [44].

Tal como se muestra en la Figura 3-3, cuando $A=B$ ambos elementos presentan la misma importancia relativa y el valor asignado es 1. Si $A > B$, se aplica una relación lineal creciente, mientras que para $A < B$ se emplea su función recíproca, garantizando coherencia y simetría en las comparaciones. Este procedimiento permite automatizar la generación de las matrices, minimizar inconsistencias y mantener la linealidad del modelo sin alterar la lógica del método [44].

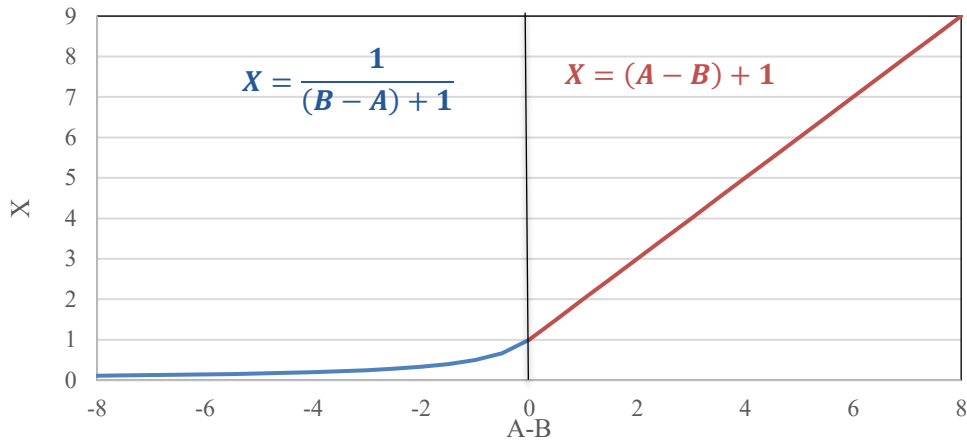


Figura 3-3 Función matemática para hallar los valores de comparación (basado en [44])

A partir de los valores de comparaciones, se construyen matrices cuadradas de comparación por pares. Todas las comparaciones se organizarán en una matriz $A = (a_{ij})_{n \times n}$ siendo a_{ij} el valor de la escala numérica seleccionada según la Tabla 3-1 y n el número de criterios, o alternativas, según corresponda, y, por consiguiente, la dimensión de la matriz.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1j} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (3-1)$$

Para cumplir las propiedades de homogeneidad, reciprocidad y consistencia, la matriz adquiere la siguiente forma:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1j} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1j} & 1/a_{2j} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (3-2)$$

Esto se debe a que el componente a_{ij} de la matriz A representa la importancia relativa del elemento de la fila i , cuando se le compara con el elemento de la columna j . Por consiguiente, están relacionados teniendo propiedades de reciprocidad. Si por ejemplo el valor de $a_{ij} = 9$, el valor de $a_{ji} = 0,11$ (el elemento i es extremadamente más importante que el elemento j). La diagonal de la matriz siempre ha de ser 1, puesto que se estaría comparando el elemento con el mismo [49].

Además de cumplirse la reciprocidad, se cumplen los principios de combinatoria puesto que el número de comparaciones es igual a $(n \times n - n)/2$ [49], siendo n el número de elementos. En estos casos; para 7 criterios, se realizarán 21 comparaciones; mientras que para 4 alternativas tendrán lugar 6 comparaciones pareadas entre ellas.

3.1.4 Cálculo del vector de prioridad

Una vez establecida la relación de importancia relativa entre los elementos a través de la matriz de comparación pareada, se procede al cálculo del vector propio, que representa el peso relativo de cada elemento dentro del conjunto analizado. Este procedimiento se aplica tanto para obtener el peso de los criterios (W) como para calcular los vectores de prioridad de las alternativas respecto a cada criterio (V).

El cálculo del vector propio se puede resumir en normalizar la matriz A y hallar el valor promedio de cada fila de la matriz normalizada. Se detalla este cálculo en tres pasos:

1. Se suman los valores de cada columna de la matriz de comparaciones pareada.

$$S_1, S_2 \dots S_j = \forall j: \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (3-3)$$

2. Se normaliza la matriz A dividiendo cada elemento por la suma de su columna.

$$B = \begin{pmatrix} 1/S_1 & a_{12}/S_2 & \dots & a_{1j}/S_j \\ a_{21}/S_1 & 1/S_2 & \dots & a_{2j}/S_j \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1}/S_1 & a_{i2}/S_2 & \dots & 1/S_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1j} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{i1} & b_{i2} & \dots & b_{ij} \end{pmatrix} \quad (3-4)$$

3. Se halla el vector propio (V o W) calculando la media de cada fila de la matriz normalizada (B).

$$V = \begin{pmatrix} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_{1j} \\ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_{2j} \\ \vdots \\ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_{ij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_i \end{pmatrix} \quad (3-5)$$

En la expresión 3-5 se muestra el cálculo del vector de prioridad de las alternativas (V). Dependiendo del nivel de la jerarquía analizado, este vector puede corresponderse también al peso de los criterios, el cual se representaría con la letra W.

3.1.5 Comprobación de consistencia del método

A lo largo del proceso pueden aparecer matrices de comparación con cierto grado de inconsistencia. Esto se debe a que los juicios empleados en el método AHP se basan en valoraciones humanas, por lo que alcanzar una coherencia perfecta en todas las comparaciones resulta difícil en la práctica.

Para detectar dicha inconsistencia, el AHP incorpora un mecanismo específico que constituye una etapa esencial del método. En caso de que se detecte una matriz con un nivel de inconsistencia superior al aceptable, habrá que revisar y rehacer las valoraciones de la matriz de comprobación por pares. De no llevarse a cabo esta verificación, los resultados obtenidos perderían validez desde el punto de vista metodológico.

Para saber si el método ha sido consistente o no, han de seguirse los siguientes cinco pasos:

1. Se halla el vector fila (F) que resulta ser el producto entre la matriz de comparaciones pareada (A) y el vector de prioridad (V):

$$F = A \times V \Rightarrow \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_i \end{pmatrix} \quad (3-6)$$

2. Se halla la matriz cociente (Q) que es la división de cada elemento de T entre su correspondiente valor de V:

$$Q = \begin{pmatrix} f_1/v_1 \\ f_2/v_2 \\ \vdots \\ f_j/v_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_i \end{pmatrix} \quad (3-7)$$

3. La media de los cocientes da como resultado el valor máximo de lambda:

$$\lambda_{max} = \frac{q_1 + q_2 + \dots + q_i}{n} \quad (3-8)$$

4. Con el valor máximo de lambda se puede hacer uso de la siguiente expresión para obtener el índice de consistencia (IC):

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3-9)$$

5. La razón de consistencia (RC) es fruto de la división entre el índice de consistencia y el índice de consistencia aleatorio, el cual se obtiene a partir de la Tabla 3-2:

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (3-10)$$

Orden de la matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio (IA)	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Tabla 3-2 Valores del Índice aleatorio (basado en [47])

En este trabajo, de acuerdo con la Tabla 3-2, el índice de consistencia aleatorio tomará el valor de 0,9 puesto que las matrices con las que se va a operar son de orden 4.

Se considerará consistente el método si el valor de la razón de consistencia (RC) no supera el 5% en matrices de orden 3, el 9% en matrices de orden 4 y el 10% para las de orden 5 o superior [48]. Es decir, el resultado de la RC en este proyecto debe de ser siempre menor a 0,09.

3.1.6 Determinación del ranking de prioridad

Una vez hallado el vector de prioridad de cada alternativa para cada criterio, y siempre y cuando la razón de consistencia no supere el valor límite se puede proceder al último paso, establecer el ranking de alternativas.

Para poder ordenar las alternativas, se calculan los valores de prioridad final (P) de cada una de ellas mediante la multiplicación de dos matrices. La primera de ellas contiene los vectores de prioridad (V) calculados previamente y es una matriz de tantas filas como alternativas y tantas columnas como criterios. La segunda matriz (W) es la que contiene los valores de los pesos de cada criterio. De esta forma se consigue relacionar cada vector de prioridad de la alternativa asociado a cada criterio con su correspondiente peso.

$$P = V \times W \Rightarrow \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1j} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{i1} & v_{i2} & \dots & v_{ij} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_i \end{pmatrix} \quad (3-11)$$

3.2 Método VIKOR

3.2.1 Introducción al método

El método VIKOR fue propuesto por Serafim Opricovic a finales de la década de 1990, aunque no fue hasta 2004 su difusión internacional gracias a su trabajo conjunto con Tzeng, donde se comparó su comportamiento con otros métodos de decisión multicriterio ampliamente utilizados [50].

El acrónimo VIKOR procede del serbio “Vlse Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Rešenje”, que puede traducirse al español como: “Optimización multicriterio y solución de compromiso”. Este nombre refleja directamente la filosofía del método: la búsqueda de una solución de compromiso aceptable teniendo en cuenta criterios múltiples y generalmente conflictivos. La solución de compromiso es aquella alternativa que, a diferencia de la solución ideal, no es la mejor en todos los criterios, pero ofrece el mejor equilibrio global entre ellos [50].

En la Figura 3-4, f_1^* y f_2^* representan los valores ideales de los criterios 1 y 2 respectivamente, mientras que f_1^c y f_2^c indican los valores de dichos criterios asociados a la solución de compromiso. Estos valores se derivan de los puntos F^* , solución ideal teórica, y F^c , solución de compromiso factible, cuya distancia refleja el grado de aproximación a la solución ideal.

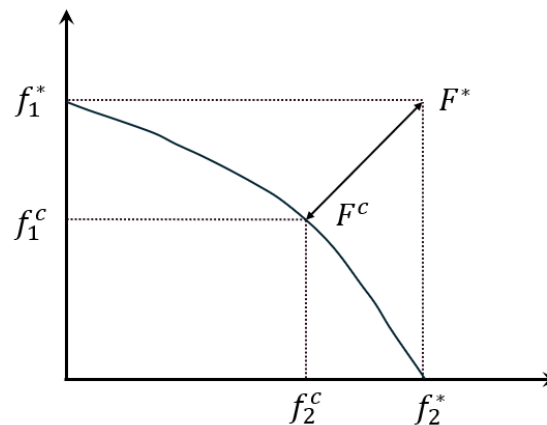


Figura 3-4 Soluciones ideales y de compromiso (basado en [51])

Al igual que en AHP, el método VIKOR también se desarrolla siguiendo unos pasos siguiendo un diagrama de flujo. Estos pasos vienen reflejados en la Figura 3-5.

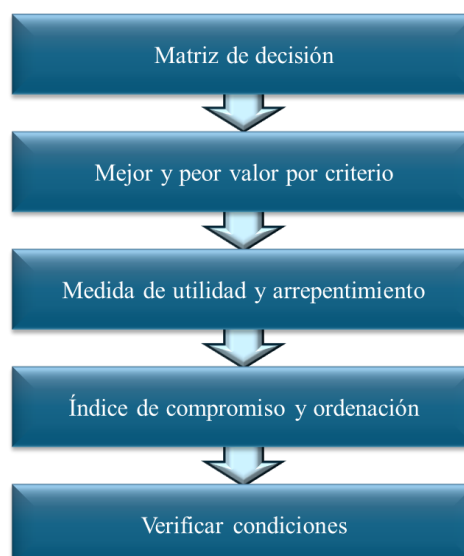


Figura 3-5 Diagrama de flujo del método VIKOR

3.2.2 Construcción de la matriz de decisión

El primer paso es la construcción de la matriz de decisión la cual, como viene reflejado en la Tabla 3-3, recoge la valoración de cada alternativa respecto a cada criterio considerado.

		Criterios			
		C ₁	C ₂	...	C _j
Alternativas	A ₁	f_{11}	f_{12}	...	f_{1j}
	A ₂	f_{21}	Valoraciones		f_{2j}
	...	...	...		...
	A _i	f_{i1}	f_{i2}	...	f_{ij}

Tabla 3-3 Matriz de decisión (autoría propia)

Asimismo, se debe realizar una distinción entre los dos tipos de criterios que se pueden encontrar:

- Criterios de beneficio: cuanto mayor es el valor del criterio, mejor es el desempeño de la alternativa (por ejemplo: madurez tecnológica o eficiencia).
- Criterios de coste: cuanto menor es el valor del criterio, mejor es el desempeño de la alternativa (por ejemplo: coste o consumo energético).

3.2.3 Determinación del mejor y peor valor por cada criterio

Para cada criterio, se deberán de distinguir los valores extremos, es decir el mejor valor (f_j^* , valor ideal) y el peor valor (f_j^- , valor anti-ideal) de cada criterio a partir de la matriz de decisión. Estos valores servirán como referencia para el resto del procedimiento. Es importante reseñar que estos valores varían en función de los dos tipos de criterio pudiendo encontrar:

- Para criterios de beneficio: $f_j^* = \max_i (x_{ij})$; $f_j^- = \min_i (x_{ij})$
- Para criterios de coste: $f_j^* = \min_i (x_{ij})$; $f_j^- = \max_i (x_{ij})$

Estos valores definen una solución ideal teórica y una solución desfavorable, que permiten medir posteriormente la distancia de cada alternativa respecto a una situación óptima.

3.2.4 Cálculo de la medida de utilidad y de arrepentimiento

Una vez determinados los valores ideal y anti-ideal de cada criterio, se evalúa el comportamiento de cada alternativa mediante dos medidas complementarias: la medida de utilidad y la medida de arrepentimiento.

Para este cálculo se hace uso de los valores de peso (w_j) que se han otorgado a cada criterio mediante el método AHP. Las ecuaciones para hallar las dos medidas son las siguientes:

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (3-12)$$

$$R_i = \max_j \left(w_j \cdot \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right) \quad (3-13)$$

La medida S_i representa el grado de alejamiento global de la alternativa i respecto a la solución ideal, teniendo en cuenta todos los criterios y sus pesos relativos; mientras que la medida R_i , indica el mayor alejamiento relativo de la alternativa i respecto a la solución ideal en un único criterio.

El método VIKOR utiliza ambas medidas para garantizar que la alternativa seleccionada no solo sea adecuada en promedio, sino que también evite un desempeño extremadamente desfavorable en alguno de los criterios.

3.2.5 Cálculo de índice de compromiso y ordenación de las alternativas

Una vez calculadas las medidas de utilidad (S_i) y arrepentimiento (R_i) de cada alternativa, se combinan ambas magnitudes en un único indicador denominado índice de compromiso (Q_i). Este índice mide el grado de cercanía de cada alternativa a la solución ideal a través de la siguiente ecuación:

$$Q_i = v \cdot \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \cdot \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \quad (3-14)$$

Siendo: $S^* = \min_i (S_i)$; $S^- = \max_i (S_i)$; $R^* = \min_i (R_i)$; $R^- = \max_i (R_i)$ y $v \in [0, 1]$.

El parámetro v refleja la importancia relativa del criterio de utilidad frente al de arrepentimiento, de tal manera que si toma valor 1 se prioriza exclusivamente S_i , mientras que si toma el valor 0 se prioriza exclusivamente R_i . En la mayoría de las aplicaciones prácticas como en [51], y en este proyecto, se adopta el valor $v = 0,5$, que representa una situación de consenso entre ambos enfoques.

Gracias a calcular los valores de Q_i se puede proceder a la ordenación de las alternativas. Es importante reseñar que esta clasificación se realiza en orden creciente del índice Q_i , de modo que la alternativa con el menor valor es considerada la mejor. Esto se debe a que dicho valor representa la distancia a la solución ideal.

Además de la clasificación basada en el índice Q_i , el método VIKOR considera también las ordenaciones obtenidas a partir de las medidas S_i y R_i . Aunque estas ordenaciones complementarias no influyen en la solución final, se utilizan posteriormente para verificar la estabilidad de la decisión.

3.2.6 Verificación

El método VIKOR finaliza con un proceso de verificación que tiene como objetivo confirmar si la alternativa mejor clasificada puede considerarse una solución de compromiso válida.

Para ello, se comprueban dos condiciones: ventaja aceptable y estabilidad en la decisión.

- Ventaja aceptable: esta condición garantiza que la alternativa mejor clasificada presenta una diferencia suficientemente significativa respecto a la siguiente, evitando selecciones basadas en diferencias marginales. Sea A_1 la alternativa mejor clasificada, A_2 la segunda mejor y m el número total de alternativas; la condición de ventaja aceptable se cumple si:

$$Q(A_2) - Q(A_1) \geq \frac{1}{m - 1} \quad (3-15)$$

- Estabilidad en la decisión: esta condición asegura que la alternativa no resulta ganadora únicamente por el índice de compromiso, sino que también sea la primera clasificada en la medida de utilidad y/o arrepentimiento, presentando un comportamiento sólido.

En función del cumplimiento de las condiciones anteriores, se pueden distinguir los siguientes casos para considerar la solución de compromiso:

- Caso 1: la solución de compromiso es la alternativa mejor clasificada según Q_i .
- Caso 2: la solución de compromiso está formada por dos alternativas: la mejor clasificada según Q_i y la mejor clasificada según S_i o R_i .

- Caso 3: la solución de compromiso está formada por un conjunto de alternativas comprendidas entre la primera clasificada y aquella que cumpla con esta la inecuación 3-15.

En la Tabla 3-4 se especifica qué debe de cumplirse para considerar un caso u otro.

Ventaja aceptable	Estabilidad en la decisión	Solución de compromiso
Se cumple	Se cumple	Caso 1
Se cumple	No se cumple	Caso 2
No se cumple	Se cumple	Caso 3

Tabla 3-4 Solución de compromiso según cumplimiento de condiciones

3.3 Criterios seleccionados para la evaluación de alternativas

En este apartado se exponen los criterios sobre los que se va a someter a las alternativas a estudio, las cuales corresponden con las tecnologías descritas en el apartado 2.4, es decir, la absorción química, la adsorción, la separación mediante membranas y la criogenización.

Los criterios seleccionados (eficiencia, consumo energético, madurez tecnológica, seguridad, coste, escalabilidad e impacto ambiental) se presentan en los siguientes subapartados, cuyo contenido se compone de una explicación del objetivo del criterio, una reseña del comportamiento de cada alternativa en base a dicho criterio y finaliza con una conclusión donde se otorga una puntuación a cada alternativa en base a la explicación previa.

La evaluación se ha realizado a partir de una revisión amplia de fuentes bibliográficas especializadas y de carácter técnico-científico. No obstante, en muchas de ellas no existe una interpretación completamente homogénea, ya que en muchos casos se analiza una variante específica dentro de cada tecnología como puede ser criogenización en procesos de oxidación, adsorción con un material concreto o siguiendo un ciclo determinado o distintos tipos de membranas. De ahí la motivación del presente trabajo: sintetizar y armonizar la información disponible para ofrecer una evaluación global de cada tecnología en su conjunto, permitiendo una comparación más coherente y representativa.

3.3.1 Eficiencia

La eficiencia (evaluado mediante porcentaje) se define como la capacidad operativa de un sistema para capturar CO₂ del flujo de gases de combustión, minimizando las pérdidas. La eficiencia de captura puede llegar a ser uno de los parámetros más determinantes pues no es otra cosa que la medición del objeto final de la tecnología, capturar dióxido de carbono.

La absorción química presenta una elevada eficiencia de captura gracias a su alta capacidad de reacción con el gas, lo que permite alcanzar una eficiencia de captura en torno al 90%. Su principal ventaja competitiva radica en la estabilidad del rendimiento ante bajas presiones parciales de CO₂, aunque esta estabilidad se puede ver comprometida por la degradación del disolvente y la necesidad de pretratamiento del gas de combustión [52].

La adsorción presenta eficiencias en torno al 85%, aunque muestra una mayor sensibilidad a variables como la presión, la temperatura y la composición del gas. Sin embargo, la estabilidad del proceso está condicionada por la amplia selección de materiales adsorbentes con alta afinidad con el CO₂ y a la optimización de los ciclos de regeneración, ya sean PSA, TSA o VSA [52].

La separación de gases mediante membranas ha mostrado avances significativos en selectividad y permeabilidad. Sin embargo, presentan una limitación importante debido a la baja presión parcial de CO₂ en procesos postcombustión, lo que reduce la fuerza impulsora del proceso, obteniéndose eficiencias en torno al 80% en configuraciones multietapa [52].

La separación criogénica emplea la licuefacción del CO₂ mediante ciclos de refrigeración y compresión. El mecanismo basado en cambio de fase minimiza las pérdidas por fugas, permitiendo eficiencias de captura superiores al 95% y garantizando un producto final de muy alta pureza. No obstante, esta gran eficiencia de captura se debe a un alto consumo energético [53].

Todas presentan niveles de eficiencia satisfactorios, aunque unas dependen más que otras de otros factores como la concentración del gas o procesos con multietapa. Esos factores penalizarán a alternativas como la criogenización en la evaluación de otros criterios, por lo que atendiendo únicamente a la máxima eficiencia que pueden ofrecer, se otorgan 9 puntos a la criogenización, le siguen la absorción, la adsorción y las membranas; con 8, 7 y 6 puntos respectivamente.



Figura 3-6 Ranking de alternativas según la eficiencia

3.3.2 Consumo energético

El consumo energético se refiere a la energía necesaria para llevar a cabo los procesos de captura. Este requerimiento varía según la tecnología, pudiendo encontrar regeneración del disolvente en absorción, los ciclos de calentamiento o presurización en adsorción, la compresión del gas en membranas y los procesos de refrigeración en criogenización. Este criterio resulta determinante, pues impacta directamente en la eficiencia global del sistema, en sus costes o incluso en el impacto medioambiental.

La absorción química presenta una elevada demanda energética asociada principalmente a la regeneración térmica del disolvente. La energía requerida, comprendida entre 3 y 5 MJ/tCO₂ para romper los enlaces químicos formados durante la captura y la operación de grandes columnas de absorción penalizan en gran medida su valoración en este criterio [20].

La adsorción presenta un consumo inferior al de la absorción, ya que no requiere regeneración de disolventes líquidos. La energía demandada, situada entre los valores de 2 y 4 MJ/tCO₂ depende del tipo de ciclo empleado: en PSA proviene de la compresión, mientras que en TSA está asociada al calentamiento del adsorbente [20].

Las tecnologías de membranas se caracterizan por un bajo consumo energético, ya que no requieren regeneración térmica del material ni utilización de disolventes químicos. Aun así, la necesidad de compresión del gas para mantener gradientes de presión adecuados supone un consumo eléctrico comprendido entre 2 y 3 MJ/tCO₂ [20].

La criogenización es considerada una tecnología con alta demanda energética (4-6 MJ/tCO₂) debido al gran consumo necesario para permitir la licuefacción del CO₂, es decir, debido a las etapas de compresión y refrigeración necesarias para alcanzar temperaturas muy bajas, y más en el caso de procesos de postcombustión, donde los gases se encuentran a elevadas temperaturas [20].

En resumen, la tecnología con menor consumo energético es la separación por membranas (6 puntos), seguida por la adsorción (5 puntos). La absorción (3 puntos) presenta una penalización energética significativa, aunque por detrás de la criogenización (1 punto) que se posiciona como la alternativa más demandante.



Figura 3-7 Ranking de alternativas según el consumo energético

3.3.3 Madurez tecnológica

La madurez tecnológica evalúa el grado de desarrollo y preparación de las alternativas para su implementación a escala industrial, considerando el nivel de validación, fiabilidad operativa y disponibilidad comercial. Se mide mediante la escala TRL (del inglés, Technology Readiness Level) [54], que clasifica el desarrollo tecnológico según los niveles descritos en la Figura 3-8.

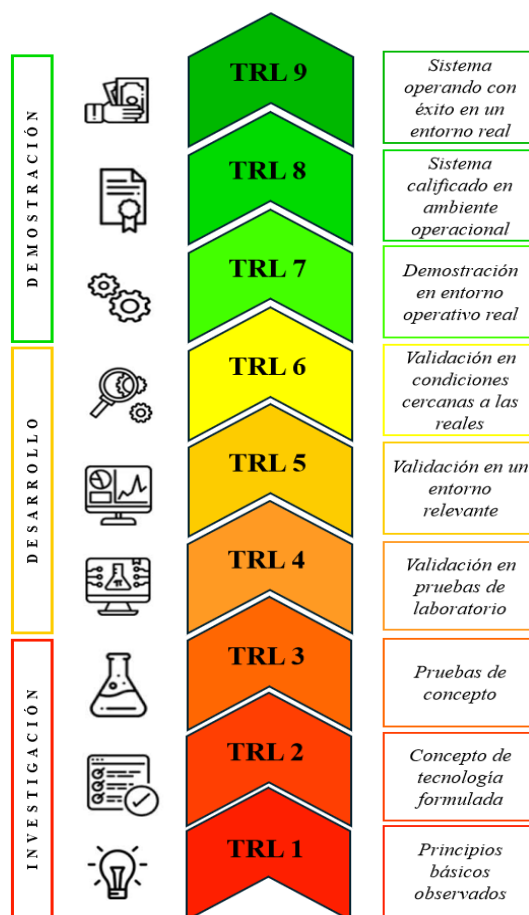


Figura 3-8 Niveles de maduración tecnológica (autoría propia)

La absorción química es actualmente la tecnología más madura para captura postcombustión. Existen numerosas instalaciones industriales que ya adatan esta tecnología por lo que ha alcanzado los niveles más altos de preparación tecnológica (TRL 9) [55].

La adsorción presenta un grado de madurez medio-alto (TRL 7). Aunque es una tecnología madura en ciertas aplicaciones industriales, su implementación a gran escala no llega a los niveles de la absorción química [55].

Si bien las tecnologías de membrana han experimentado un importante desarrollo tecnológico, aún presentan desafíos relacionados con la durabilidad, la selectividad y el mantenimiento del rendimiento a largo plazo, lo que justifica una madurez calificada en TRL 6 [55].

La separación criogénica se encuentra en una fase de desarrollo (TRL 5), con limitaciones persistentes en la integración a gran escala para gases de postcombustión [55].

En consecuencia, se ha asignado una puntuación de 9 puntos a la absorción por su consolidación industrial, 7 puntos a la adsorción, 6 puntos a las membranas y por último 5 puntos a la criogenización, puntuación que se corresponde con los TRL asociados a cada una de ellas.



Figura 3-9 Ranking de alternativas según la madurez tecnológica

3.3.4 Seguridad

La seguridad evalúa los riesgos asociados a la operación de cada tecnología. Estos riesgos pueden ir desde el manejo de sustancias químicas hasta operaciones a altas o bajas temperaturas, o presiones elevadas, pudiendo suponer un riesgo para la funcionalidad del sistema o incluso para la salud de los operadores.

La absorción química tiene dos riesgos asociados. El principal es el relacionado con los procesos químicos que tienen lugar por el uso de disolventes, que al juntarse con óxidos de azufre (SO_x) y de nitrógeno (NO_x) pueden causar su degradación a la vez que formación de subproductos tóxicos como sales de sulfato o nitrosaminas, que reducen la capacidad de captura e incrementan la corrosión en el sistema. A esto se suma el riesgo térmico asociado a las altas temperaturas necesarias para la regeneración del disolvente [56].

Los sistemas de adsorción no requieren el uso de compuestos químicos sino materiales sólidos reutilizables, por lo que el riesgo se reduce en comparación con la absorción. El peligro proviene según la configuración, siendo en PSA, un riesgo mecánico asociado a la presurización y despresurización, y en TSA, el calentamiento del lecho adsorbente (150 °C). A este riesgo moderado se le suma la sensibilidad de los adsorbentes a la humedad y a ciertos contaminantes como el azufre y el óxido de nitrógeno [56].

Las membranas presentan el perfil de seguridad más favorable para el caso de los riesgos a los que se pueden someter los operadores, ya que a diferencia de las dos anteriores, no requieren de utilización de disolventes químicos, ni generan residuos peligrosos durante la operación. Sin embargo, pueden presentar problemas de resistencia a altas presiones, requisitos estrictos de temperatura y problemas de selectividad y permeabilidad. Todo ello implica riesgos estructurales moderados [56].

La criogenización opera a temperaturas extremadamente bajas (< -78,5 °C). Estas condiciones suponen riesgos asociados a la manipulación de fluidos a muy baja temperatura, así como posibles problemas de formación de hielo que pueden llegar a bloquear el sistema. Además, previamente al enfriamiento del gas, este se somete a una alta compresión que hace aumentar el riesgo operativo [56].

En definitiva, a pesar de no ser una tecnología peligrosa para la salud, sus posibles problemas operativos hacen que las membranas y la adsorción queden empatadas con 5 puntos. Se asignan 4 puntos a la absorción química, y, 3 puntos a la criogenización, dada la severidad de sus condiciones operativas.



Figura 3-10 Ranking de alternativas según la seguridad

3.3.5 Coste

El coste evalúa la viabilidad económica de cada alternativa considerando, por un lado, los costes de capital (inversión necesaria para la instalación de equipos e infraestructura), y por otro, los costes operativos, asociados al funcionamiento continuo del sistema. La ordenación de las alternativas se ha realizado en función del coste por tonelada de CO₂ capturada, entendiendo que este valor integra tanto la inversión necesaria como el rendimiento del proceso.

El coste de captura en tecnologías basadas en disolventes se sitúa en torno a 50-100 USD/tCO₂ [20]. Este dato se debe en gran medida a los costes operativos debido a su alto consumo energético, además de los gastos relacionados con la reposición y tratamiento de la monoetanolamina la cual sufre una degradación con el paso del tiempo.

La adsorción suele ser más barata, sin embargo, los costes varían significativamente según el adsorbente y la configuración del proceso, situándose en torno a 30 y 80 USD/tCO₂ [20]. Por lo general, es la mejor opción en términos económicos, gracias a la posibilidad de reutilización de los adsorbentes, que, aunque su durabilidad es limitada es más rentable que la renovación continua.

Los costes asociados a la fabricación de membranas son causados por su sustitución periódica y la necesidad de grandes áreas de separación, representando un intervalo de coste de 60-120 USD/tCO₂, por lo que su competitividad económica frente a otras alternativas es menor [20].

La criogenización requiere equipos de compresión y refrigeración con elevada demanda energética, lo que incrementa en gran medida los costes (70-150 USD/tCO₂) [20]. Dado que el consumo energético es uno de los principales factores económicos, esta tecnología se ve afectada de forma negativa competitivamente, principalmente en aplicaciones postcombustión.

La puntuación en base al coste resulta de la siguiente manera: 7 puntos a la adsorción, 5 puntos a la absorción química, 4 puntos a la separación mediante membranas y 2 puntos a la criogenización.



Figura 3-11 Ranking de alternativas según el coste

3.3.6 Escalabilidad

Se entiende por escalabilidad a la capacidad de una tecnología a ser implementada a gran escala industrial manteniendo un rendimiento estable y costes razonables. A diferencia de la madurez tecnológica, que mide el grado de desarrollo y validación; este criterio considera la facilidad de integración en plantas existentes, la disponibilidad de materiales y la complejidad del sistema.

La absorción química presenta una alta escalabilidad, ya que es la tecnología más consolidada en aplicaciones postcombustión y cuenta con experiencia operativa a escala industrial. Su diseño modular permite su integración en centrales térmicas existentes, aunque implica una penalización energética significativa [53].

La adsorción tiene potencial de escalado, dado que hay diversos adsorbentes como las zeolitas que están ampliamente disponibles y son comerciales. Sin embargo, presenta desafíos relacionados con la gestión de grandes volúmenes de gas y la optimización de los ciclos PSA/TSA, lo que puede limitar su implantación masiva [53].

Las membranas ofrecen ventajas en términos de modularidad en diseño y menor requerimiento de espacio. No obstante, para hacer frente a grandes volúmenes de gases puede requerir grandes superficies de membrana y múltiples etapas, convirtiendo el sistema en más complejo y dificultando su implementación en plantas de gran tamaño [53].

El escalado de la criogenización en postcombustión se ve lastrado por el manejo de caudales masivos con baja densidad de CO₂. Esto exige una infraestructura de compresión y refrigeración de grandes dimensiones y difícil de lograr [53].

Por todo ello se ha considerado otorgar con 9 puntos a la absorción, 7 puntos a las membranas, 6 a la adsorción y 3 puntos a la criogenización.



Figura 3-12 Ranking de alternativas según la escalabilidad

3.3.7 Impacto ambiental

El impacto medioambiental tiene en cuenta los efectos secundarios de las tecnologías en la naturaleza, derivados del consumo energético, el uso de materiales y la generación de residuos. Se puede definir como la evaluación de las implicaciones sobre ecosistemas, calidad del aire y sostenibilidad general.

La absorción presenta desafíos ambientales asociados a la degradación del disolvente en presencia de SO_x y NO_x. Esto implica formación de subproductos, sus posibles emisiones asociadas y necesidad de tratamiento adicional. Además, el elevado consumo energético, incrementan su impacto ambiental, ya que puede haber emisiones indirectas si la energía no proviene de fuentes renovables [56].

En el caso de la adsorción, el uso de materiales sólidos reutilizables hace que la generación de residuos sea menor por lo que mejora el perfil ambiental. No obstante, una vez que el adsorbente queda

inutilizable y es desechado causa daños ambientales por su acumulación y sensibilidad a la humedad y otros contaminantes [56].

Las membranas presentan grandes ventajas ambientales, ya que no requieren disolventes químicos ni generan residuos durante su operación a diferencia de las dos anteriores. Esto, sumado a las ventajas en cuanto a bajo consumo energético, coloca a esta tecnología como la mejor alternativa en términos ambientales [56].

La criogenización permite obtener CO₂ de alta pureza, ya en estado líquido para su transporte, no genera residuos y no requiere el uso de productos químicos. Pese a todo ello, se trata de una tecnología cuyo impacto ambiental se debe a su gran consumo energético, que al igual que la absorción, puede conllevar a emisiones indirectas [56].

En consecuencia, considerando la generación de residuos, el uso de sustancias químicas y la intensidad energética, se asignan 7 puntos a las membranas, 6 puntos a la adsorción, 5 puntos a la criogenización, y, por último, 3 puntos a la absorción.



Figura 3-13 Ranking de alternativas según el impacto ambiental

En la Tabla 3-5 se resumen los valores cualitativos y cuantitativos más relevantes de las cuatro tecnologías analizadas previamente en función de los siete criterios definidos. Esta visión conjunta facilita la comparación global entre alternativas.

Criterios	Absorción química	Adsorción	Membranas	Criogenización
Eficiencia	≈ 90%	≈ 85%	≈ 80%	>95%
Consumo energético	3-5 MJ/tCO ₂	2-4 MJ/tCO ₂	2-3 MJ/tCO ₂	4-6 MJ/tCO ₂
Madurez tecnológica	TRL 9	TRL 7	TRL 6	TRL 5
Seguridad	Baja	Moderada	Alta	Baja
Coste	50-100 USD/tCO ₂	30-80 USD/tCO ₂	60-120 USD/tCO ₂	70-150 USD/tCO ₂
Escalabilidad	Muy alta	Alta	Moderada	Limitada
Impacto ambiental	Muy alto	Moderado	Bajo	Moderado

Tabla 3-5 Resumen de alternativas en función de los criterios [20, 52-56]

La Tabla 3-6 señala las principales ventajas y desventajas de cada tecnología. A diferencia de la tabla anterior, que permitía comparar las alternativas de forma más directa, esta tabla aporta un análisis

más explicativo. Su función es complementar la evaluación previa y ayudar a justificar los resultados obtenidos.

	Ventajas	Desventajas
Absorción	Alta eficiencia de captura. Tecnología más madura. Simplicidad y posibilidad de utilización a presiones de CO ₂ bajas. Adecuado para reacondicionamiento.	Necesidad de limpiar los gases de escape. Corrosividad de los aparatos del sistema. Elevada demanda energética para regenerar el disolvente. Impacto ambiental debido a la toxicidad y pérdida del disolvente.
Adsorción	Fácil mantenimiento de la instalación. Proceso reversible, reutilización del adsorbente. Amplia selección de materiales adsorbentes (zeolitas, MOF...). Amplio rango de operatividad (TSA/PSA/VSA).	Sensibilidad al azufre, NO _x y humedad. Escasa durabilidad de los adsorbentes. Problema con la resistencia a altas temperaturas. Baja selectividad de CO ₂ .
Membranas	Bajo consumo energético. Proceso simple, con sistema modular sencillo. Sin flujos de generación de residuos. Sin reactivos químicos.	Problemas de resistencia a altas presiones. Requisitos estrictos de temperatura. Problemas de permeabilidad y selectividad Dificultad para mantener el rendimiento durante un funcionamiento prolongado.
Criogenización	Alta eficiencia de captura. Alta pureza de CO ₂ . Captura en estado líquido, listo para transporte. Sin reactivos químicos.	Gran penalización energética debido a la refrigeración. Altos costes de capital. Posibilidad de formación de hielos y obstrucción del sistema

Tabla 3-6 Ventajas y desventajas de cada alternativa [52, 53, 56]

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el anterior capítulo se han explicado los métodos de análisis multicriterio que se van a aplicar, se han definido las diferentes alternativas de tecnologías de captura y los criterios sobre las que van a ser evaluadas, por lo que ya se tienen las bases necesarias para proceder a la exposición de resultados y su discusión.

En primer lugar, se presentan los resultados derivados del método AHP, incluyendo las matrices de comparación por pares, los vectores de prioridad obtenidos para cada criterio y la verificación de consistencia del modelo. A partir de estos resultados se establece una primera jerarquización de las alternativas en función de su prioridad global ponderada.

Posteriormente, se aplica el método VIKOR con el fin de identificar la solución de compromiso más cercana a la solución ideal teórica, evaluando simultáneamente la utilidad global y la medida de arrepentimiento. Este segundo enfoque permite contrastar los resultados obtenidos con AHP y reforzar la solidez del análisis.

Finalmente, se incorpora un análisis de sensibilidad para examinar la estabilidad de la alternativa seleccionada ante posibles variaciones en la ponderación de los criterios. Este último apartado resulta especialmente relevante, ya que permite evaluar la robustez de la decisión y detectar posibles cambios en la clasificación en función de distintos escenarios de prioridad.

4.1 Resultados aplicando el método AHP

En este apartado se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación del proceso de análisis jerárquico. En primer lugar, se realiza la ponderación de los criterios considerados (W). A continuación, se lleva a cabo la ponderación de cada alternativa respecto a cada criterio, obteniendo su vector de prioridad (V). Finalmente, a partir de los pesos obtenidos, se determina la prioridad global y se establece el ranking final resultante.

4.1.1 Ponderación de criterios

El primer paso en la aplicación del método consiste en determinar el peso de cada uno de los criterios considerados. Para ello, se ha hecho uso de la literatura científica, concretamente de un artículo de investigación desarrollado por Afshin Davarpanah [57]. A partir de dicha referencia se ha establecido el orden de relevancia de los criterios empleados en el presente trabajo.

Una vez definida la jerarquía de importancia, se han asignado valores de prioridad comprendidos entre 1 y 7, siendo 7 el valor correspondiente al criterio considerado más influyente y 1 el menos determinante.

Esta asignación se muestra en la Tabla 4-1 junto con los acrónimos empleados para cada criterio, que serán utilizados en las tablas posteriores para facilitar la lectura y síntesis de resultados.

ORDEN DE PRIORIDAD		
Criterios		Puntuación
Eficiencia	EF	7
Consumo energético	CE	6
Coste	CT	5
Impacto ambiental	IA	4
Madurez tecnológica	MT	3
Escalabilidad	ES	2
Seguridad	SE	1

Tabla 4-1 Orden de prioridad de los criterios

A partir de estas puntuaciones individuales, los valores de comparación entre criterios para la construcción de la matriz se han obtenido aplicando la función matemática definida en la Figura 3-3, garantizando coherencia y linealidad en el proceso de comparación.

La matriz de comparaciones pareada entre criterios se muestra en la Tabla 4-2. Si la celda que encierra el valor de comparación está en color verde el criterio de la fila es más importante que el criterio de la columna, mientras que si está en violeta es menos relevante (se trata de su inversa). Las celdas azules son el resultado de una comparación entre criterios con igual importancia, en este caso toda la diagonal principal ya que se compara un criterio consigo mismo.

MATRIZ DE COMPARACIONES PAREADA DE CRITERIOS (A)							
Criterios	EF	CE	CT	IA	MT	ES	SE
EF	1	2	3	4	5	6	7
CE	1/2	1	2	3	4	5	6
CT	1/3	1/2	1	2	3	4	5
IA	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4
MT	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3
ES	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2
SE	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1
TOTAL	2,59	4,45	7,28	11,08	15,83	21,50	28,00

Tabla 4-2 Matriz de comparaciones pareada de criterios

A partir de esta matriz de comparación, se procede a su normalización, la cual se obtiene dividiendo cada elemento por la suma de su columna correspondiente, valores que se corresponden a los mostrados en la Tabla 4-3.

MATRIZ A NORMALIZADA							
Criterios	EF	CE	CT	IA	MT	ES	SE
EF	0,3857	0,4494	0,4119	0,3609	0,3158	0,2791	0,2500
CE	0,1928	0,2247	0,2746	0,2707	0,2526	0,2326	0,2143
CT	0,1286	0,1124	0,1373	0,1805	0,1895	0,1860	0,1786
IA	0,0964	0,0749	0,0686	0,0902	0,1263	0,1395	0,1429
MT	0,0771	0,0562	0,0458	0,0451	0,0632	0,0930	0,1071
ES	0,0643	0,0449	0,0343	0,0301	0,0316	0,0465	0,0714
SE	0,0551	0,0375	0,0275	0,0226	0,0211	0,0233	0,0357

Tabla 4-3 Normalización de la matriz de comparaciones pareada de criterios

A partir de la matriz normalizada se calcula el vector de prioridad asociado a los criterios, es decir sus pesos (W). Estos valores mostrados en la Tabla 4-4 representan la importancia relativa de cada criterio siendo la suma total igual a la unidad, lo cual no es casual, sino consecuencia directa del proceso de normalización aplicado anteriormente.

PESO DE LOS CRITERIOS		
Criterios		W
Eficiencia	EF	0,3504
Consumo energético	CE	0,2375
Coste	CT	0,1590
Impacto ambiental	IA	0,1056
Madurez tecnológica	MT	0,0696
Escalabilidad	ES	0,0462
Seguridad	SE	0,0318
TOTAL		1,00

Tabla 4-4 Pesos relativos de los criterios (W)

Los resultados indican que la eficiencia es el criterio con mayor peso relativo, lo que refleja que la capacidad de captura de CO₂ constituye el factor más determinante en la evaluación de las tecnologías analizadas. La madurez tecnológica, la escalabilidad y la seguridad presentan los pesos más reducidos, lo que implica que su influencia en la decisión final es más limitada.

4.1.2 Ponderación de alternativas en base a criterios

Una vez determinados los pesos relativos de los criterios, se procede a evaluar las cuatro alternativas (absorción química, adsorción, separación mediante membranas y criogenización) respecto a cada uno de ellos. En primer lugar, se analizará respecto al criterio con mayor peso, la eficiencia de captura.

Según lo reseñado en el apartado 3.3.1, donde se justificaron las puntuaciones individuales de cada alternativa según la eficiencia, se ha aplicado al igual que previamente con los criterios, la función matemática definida en la Figura 3-3. Dicha función permite obtener los valores definidos en la escala de Saaty (Tabla 3-1), es decir la importancia relativa entre alternativas.

Los valores obtenidos aplicando la función matemática se usan para la construcción de la matriz de comparación por pares, mostrada en la Tabla 4-5. El código de colores de dicha tabla es el mismo que el definido previamente para la matriz de comparación entre criterios (Tabla 4-2).

A				
CRITERIO: Eficiencia				
Alternativas	Absorción	Adsorción	Membranas	Criogenización
Absorción	1	2	3	1/2
Adsorción	1/2	1	2	1/3
Membranas	1/3	1/2	1	1/4
Criogenización	2	3	4	1
TOTAL	3,8333	6,5000	10,0000	2,0833

Tabla 4-5 Matriz de comparaciones pareada de alternativas según la eficiencia

Del mismo modo que lo realizado anteriormente con los criterios, el siguiente paso es la normalización de la matriz A (B), para posteriormente poder hallar los vectores de prioridad de cada tecnología (V).

B					V
Alternativas	Absorción	Adsorción	Membranas	Criogenización	
Absorción	0,2609	0,3077	0,3000	0,2400	
Adsorción	0,1304	0,1538	0,2000	0,1600	
Membranas	0,0870	0,0769	0,1000	0,1200	
Criogenización	0,5217	0,4615	0,4000	0,4800	

Tabla 4-6 Normalización y cálculo del vector de prioridad según la eficiencia

Por último, es necesario verificar la coherencia de la matriz de comparación construida. Tal y como se describió en el apartado 3.1, el método AHP contempla una evaluación de consistencia de los juicios realizados, con el fin de garantizar la validez de los resultados obtenidos.

Para ello, se calcula primero el vector fila (F), fruto del producto entre la matriz de comparación por pares y el vector de prioridad ($F = A \times V$). Posteriormente, se obtiene el vector cociente (Q) dividiendo cada componente del vector fila entre su correspondiente valor del vector de prioridad. A partir de la media de estos cocientes se determina el valor máximo propio de la matriz (λ_{max}).

Con este valor y siguiendo las fórmulas que se encuentran en el apartado 3.1.5, se calcula el índice de consistencia (IC), que, junto con el índice aleatorio, cuyo valor es 0,9 (matriz de orden cuatro), se consigue hallar el valor de la razón de consistencia (RC). La razón de consistencia es el dato de referencia para determinar si hay consistencia o no en el método.

Todos estos datos numéricos se exponen en la Tabla 4-7.

F (Vector Fila)	Q (Cociente)	$\lambda_{max} = 4,0310$
1,1201	4,0416	IC (Índice de consistencia) = 0,0103
0,6469	4,0160	
0,3853	4,0152	
1,8872	4,0513	
		RC (Razón de consistencia) = 0,0115

Tabla 4-7 Comprobación de consistencia de los resultados según la eficiencia

Dado que el valor de la Razón de Consistencia es menor al máximo aceptable establecido para matrices de orden cuatro ($RC < 0,09$), puede concluirse que la matriz de comparación correspondiente al criterio eficiencia presenta un nivel de consistencia adecuado.

Con el fin de evitar repeticiones y mejorar la claridad expositiva, los resultados numéricos correspondientes al resto de criterios se presentan de forma conjunta en la Tabla 4-8. Los resultados obtenidos según el criterio eficiencia también están dispuestos en dicha tabla, permitiendo así una visión global y comparativa de todos los valores obtenidos en una única página.

El desarrollo completo para cada criterio siguiendo el mismo procedimiento explicado anteriormente se incluye en el Anexo III del TFG.

Criterios	Puntuaciones	Matrices de comparaciones	Vectores de prioridad	Comprobación de consistencia
Eficiencia	Absorción: 9	$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 0,50 \\ 0,50 & 1 & 2 & 0,33 \\ 0,33 & 0,50 & 1 & 0,25 \\ 2 & 3 & 4 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,2771 \\ 0,1611 \\ 0,0960 \\ 0,4658 \end{pmatrix}$	$\lambda_{\max} = 4,0310$
	Adsorción: 6			IC = 0,0103
	Membranas: 5			RC = 0,0115
	Criogenización: 8			
Consumo energético	Absorción: 3	$\begin{pmatrix} 1 & 0,33 & 0,25 & 3 \\ 3 & 1 & 0,50 & 5 \\ 4 & 2 & 1 & 6 \\ 0,33 & 0,20 & 0,16 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,1362 \\ 0,3093 \\ 0,4919 \\ 0,0626 \end{pmatrix}$	$\lambda_{\max} = 4,0796$
	Adsorción: 5			IC = 0,0265
	Membranas: 6			RC = 0,0295
	Criogenización: 1			
Madurez tecnológica	Absorción: 9	$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 5 \\ 0,33 & 1 & 2 & 3 \\ 0,25 & 0,50 & 1 & 2 \\ 0,20 & 0,33 & 0,50 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,5423 \\ 0,2333 \\ 0,1397 \\ 0,0847 \end{pmatrix}$	$\lambda_{\max} = 4,0512$
	Adsorción: 7			IC = 0,0171
	Membranas: 6			RC = 0,0190
	Criogenización: 5			
Seguridad	Absorción: 4	$\begin{pmatrix} 1 & 0,50 & 0,50 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 3 \\ 2 & 1 & 1 & 3 \\ 0,50 & 0,33 & 0,33 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,1892 \\ 0,3507 \\ 0,3507 \\ 0,1093 \end{pmatrix}$	$\lambda_{\max} = 4,0104$
	Adsorción: 5			IC = 0,0035
	Membranas: 5			RC = 0,0038
	Criogenización: 3			
Coste	Absorción: 5	$\begin{pmatrix} 1 & 0,33 & 2 & 4 \\ 3 & 1 & 4 & 6 \\ 0,50 & 0,25 & 1 & 3 \\ 0,25 & 0,16 & 0,33 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,2399 \\ 0,5443 \\ 0,1497 \\ 0,0662 \end{pmatrix}$	$\lambda_{\max} = 4,0818$
	Adsorción: 7			IC = 0,0273
	Membranas: 4			RC = 0,0303
	Criogenización: 2			
Escalabilidad	Absorción: 9	$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 4 & 7 \\ 0,33 & 1 & 2 & 5 \\ 0,25 & 0,50 & 1 & 4 \\ 0,14 & 0,20 & 0,25 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,5423 \\ 0,2440 \\ 0,1561 \\ 0,0547 \end{pmatrix}$	$\lambda_{\max} = 4,1053$
	Adsorción: 7			IC = 0,0351
	Membranas: 6			RC = 0,0390
	Criogenización: 5			
Impacto ambiental	Absorción: 3	$\begin{pmatrix} 1 & 0,33 & 0,20 & 0,25 \\ 3 & 1 & 0,33 & 0,50 \\ 5 & 3 & 1 & 2 \\ 4 & 2 & 0,50 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,0736 \\ 0,1715 \\ 0,4709 \\ 0,2840 \end{pmatrix}$	$\lambda_{\max} = 4,0514$
	Adsorción: 5			IC = 0,0171
	Membranas: 7			RC = 0,0190
	Criogenización: 6			

Tabla 4-8 Resolución global del método AHP

Para facilitar la interpretación de los resultados, en la Figura 4-1 se muestran gráficas radar que representan los vectores de prioridad de cada alternativa. Este tipo de representación constituye una herramienta visual que permite identificar de forma rápida e intuitiva los puntos fuertes y débiles de cada tecnología en función de los criterios evaluados.

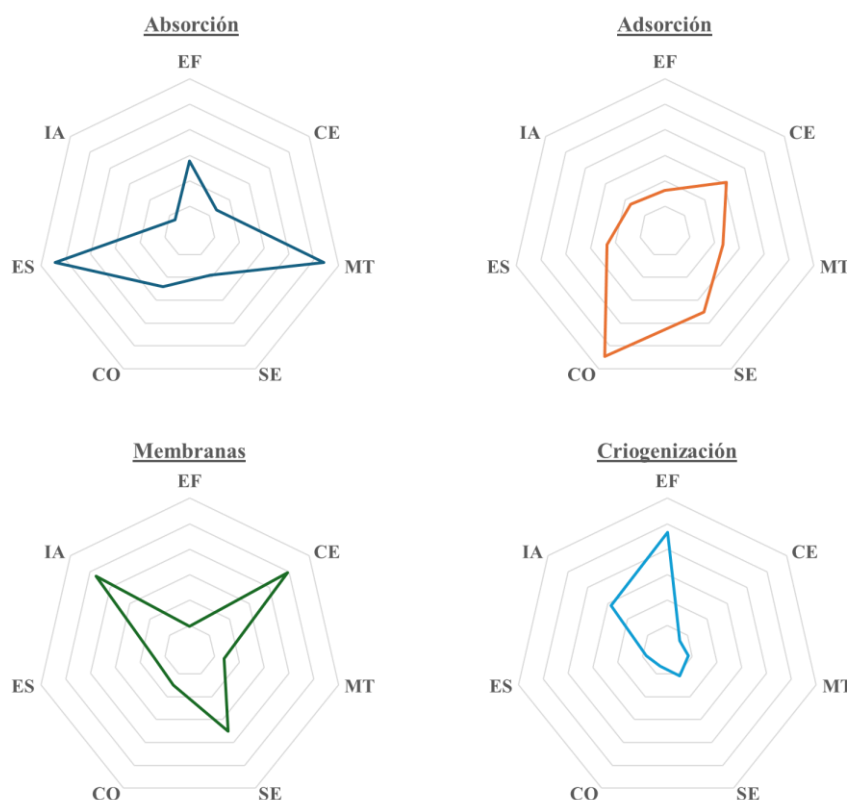


Figura 4-1 Gráficos radar de cada alternativa según vectores de prioridad

De estas gráficas, se desprende que la adsorción presenta el perfil más equilibrado, sin mostrar debilidades significativas. En contraste, la absorción y la criogenización destacan por su elevada eficiencia, aunque presentan limitaciones en otros parámetros relevantes. Además, la absorción muestra valores máximos en escalabilidad y madurez tecnológica, reflejando su alto grado de implantación industrial. Por su parte, las tecnologías de membranas destacan por su buen desempeño en consumo energético, impacto ambiental y seguridad, aunque presentan menores valores en el resto de los criterios. Puesto que ninguna tecnología presenta el mejor desempeño en todos los criterios, es necesario emplear metodologías de decisión multicriterio que permitan identificar la alternativa más equilibrada.

Con los vectores de prioridad y los pesos relativos de los criterios, se procede a su multiplicación con el fin de determinar la prioridad global de cada tecnología, tal y como se muestra en la Tabla 4-9.

VECTORES DE PRIORIDAD							
Alternativas	Criterios						
	EF	CE	CT	IA	MT	ES	SE
Absorción	0,2771	0,1362	0,2399	0,0736	0,5423	0,5453	0,1892
Adsorción	0,1611	0,3093	0,5443	0,1715	0,2333	0,2440	0,3507
Membranas	0,0960	0,4919	0,1497	0,4709	0,1397	0,1561	0,3507
Criogenización	0,4658	0,0626	0,0662	0,2840	0,0847	0,0547	0,1093

X

PESOS CRITERIOS (W)	
Criterios	Pesos
EF	0,3504
CE	0,2375
CT	0,1590
IA	0,1056
MT	0,0696
ES	0,0462
SE	0,0318

Tabla 4-9 Multiplicación de los vectores de prioridad y peso de criterios

Los resultados de dicha multiplicación se reflejan en la Tabla 4-10. Junto a dichos resultados se muestra el puesto que ocupa cada tecnología en el ranking.

PRIORIDAD GLOBAL		
Alternativas	Resultado	Ranking
Absorción	0,2443	3º
Adsorción	0,2732	1º
Membranas	0,2520	2º
Criogenización	0,2305	4º

Tabla 4-10 Ranking final de alternativas

Atendiendo al ranking final, la adsorción se sitúa en primera posición que se explica por su desempeño sólido y equilibrado. Aunque no alcanza la máxima puntuación, tampoco es la peor opción en ningún aspecto por lo que presenta un comportamiento estable y competitivo, incluso en los parámetros más influyentes como el consumo energético y el coste [20].

En segundo lugar, se posiciona la separación mediante membranas, que destaca especialmente en consumo energético e impacto ambiental. Si bien su eficiencia y su madurez tecnológica no son las mejores, su buen rendimiento en criterios relevantes le permite mantenerse en posiciones superiores dentro del ranking final [20, 57].

Siguiendo muy de cerca a las membranas se coloca la absorción química en tercera posición. Sus elevada eficiencia y madurez tecnológica no le permiten situarse en un puesto más alto debido a su mayor consumo energético y otras penalizaciones como la seguridad e impacto ambiental [20].

Finalmente, la criogenización queda en última posición. A pesar de haber obtenido la mayor puntuación en eficiencia (el criterio con mayor peso), su elevado consumo energético y sus altos costes penalizan significativamente su resultado final [20]. Este hecho pone de manifiesto que el método AHP premia el equilibrio global entre criterios y no únicamente el liderazgo en un parámetro concreto.

4.2 Resultados aplicando el método VIKOR

Una vez obtenido el ordenamiento de alternativas mediante el método AHP, se procede a aplicar VIKOR con el objetivo de contrastar los resultados anteriores desde un enfoque basado en la solución de compromiso. Este método no persigue establecer un ranking, sino identificar una solución de compromiso, entendida como aquella alternativa con la menor distancia conjunta respecto a la solución ideal, evaluando tanto su comportamiento global como el criterio en el que muestra su mayor limitación.

El primer paso consiste en la construcción de la matriz de decisión, mostrada en la Tabla 4-11, que recoge las mismas puntuaciones asignadas en el apartado 3.3 y que ya se emplearon en AHP, garantizando así coherencia metodológica y permitiendo una comparación directa entre ambos enfoques.

MATRIZ DE DECISIÓN								
		Criterios						
		EF	CE	CT	IA	MT	ES	SE
Alternativas	Absorción	8	3	9	4	5	9	3
	Adsorción	7	5	7	5	7	7	5
	Membranas	6	6	6	5	4	6	7
	Criogenización	9	1	5	3	2	3	6
fi*		9	6	9	5	7	9	7
fi-		6	1	5	3	2	3	3

Tabla 4-11 Matriz de decisión

En la Tabla 4-11 se han señalado visualmente en verde los criterios de beneficio y en rojo los de coste para facilitar su identificación. Eficiencia, madurez tecnológica, seguridad y escalabilidad se consideran criterios de beneficio, mientras que consumo energético, coste e impacto ambiental se clasifican como criterios de coste, ya que en estos un menor valor representa una situación más favorable. No obstante, esta diferenciación ya fue considerada previamente en la asignación de las puntuaciones, por lo que en la determinación de f_i^* (mejor valor) y f_j^- (peor valor) todos los criterios han sido tratados en la práctica como criterios de beneficio. Por ejemplo, el valor de 6 asignado a las membranas en el consumo energético ya indica que se trata de la alternativa que menos consume.

Siguiendo las fórmulas presentadas en el apartado 3.2.4, se construye la matriz normalizada y el cálculo de S_i y R_i para cada alternativa (Tabla 4-12). La magnitud S_i refleja el alejamiento global respecto a la solución ideal, mientras que R_i indica la mayor desviación en un criterio concreto.

CÁLCULO DE LA MEDIDA DE UTILIDAD Y ARREPENTIMIENTO										
		Criterios							Si	Ri
		EF	CE	CT	IA	MT	ES	SE		
Alternativas	Absorción	0,1168	0,1425	0,0000	0,0795	0,0279	0,0000	0,0318	0,3984	0,1425
	Adsorción	0,2336	0,0475	0,0795	0,0000	0,0000	0,0154	0,0159	0,3919	0,2336
	Membranas	0,3504	0,0000	0,1192	0,0000	0,0418	0,0231	0,0000	0,5345	0,3504
	Criogenización	0,0000	0,2375	0,1590	0,1590	0,0696	0,0462	0,0079	0,6792	0,2375

Tabla 4-12 Normalización y cálculo de S_i y R_i

Una vez obtenidas las medidas de utilidad y arrepentimiento se procede al cálculo del índice de compromiso Q_i , que integra ambas medidas en un único indicador. Para ello, se utilizan los valores extremos S^* , S^- , R^* y R^- , correspondientes al mejor y peor resultado en cada caso. La Tabla 4-13 recoge los valores calculados del índice Q_i para cada alternativa.

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE COMPROMISO			
Alternativas	Si	Ri	Qi
Absorción	0,3984	0,1425	0,0114
Adsorción	0,3919	0,2336	0,2191
Membranas	0,5345	0,3504	0,7482
Criogenización	0,6792	0,2375	0,7284
	S*= 0,3919	R*= 0,1425	
	S-= 0,6792	R-= 0,3504	

Tabla 4-13 Cálculo del índice de compromiso

El índice Q_i permite establecer una primera ordenación de las alternativas, siendo preferible aquella que presenta el menor valor. En los resultados obtenidos, la absorción muestra el valor más reducido, seguida por la adsorción, mientras que membranas y criogenización presentan valores superiores, lo que indica una mayor distancia a la solución ideal. Sin embargo, esta clasificación preliminar no permite todavía identificar de manera definitiva la solución de compromiso, para ello es necesario comprobar el cumplimiento de las condiciones de ventaja aceptable y estabilidad.

Al aplicar la condición de ventaja aceptable, se obtiene que la diferencia entre la primera y la segunda alternativa clasificadas según el índice Q_i no alcanza el umbral mínimo requerido.

$$Q(\text{Adsorción}) - Q(\text{Absorción}) = 0,2211 - 0,0114 = 0,1996 \quad (4-1)$$

$$\frac{1}{m-1} = \frac{1}{4-1} = \frac{1}{3} = 0,3333 \quad (4-2)$$

En consecuencia, la condición de ventaja aceptable no se cumple, lo que indica que la superioridad de la absorción no es suficientemente significativa respecto a la siguiente, la adsorción.

En su lugar, la solución queda constituida por el conjunto de alternativas comprendidas entre la mejor clasificada y aquella cuya diferencia en el índice Q_i respecto a la primera supera el umbral mínimo. La diferencia entre la absorción y las membranas sí lo supera, lo que indicaría que la solución de compromiso estaría formada por la absorción y la adsorción. Sin embargo, esta conclusión no puede establecerse de manera definitiva hasta comprobar el cumplimiento de la condición de estabilidad.

La condición de estabilidad establece que la alternativa mejor clasificada según el Q_i debe ocupar también la primera posición en la medida de utilidad S_i y/o en la medida de arrepentimiento R_i . El valor de R_i en la absorción es también el menor entre el resto de los valores. En consecuencia, se cumple la condición de estabilidad en la decisión.

Dado que no se cumple la condición de ventaja aceptable pero sí se cumple la estabilidad, la solución de compromiso queda constituida por el conjunto de alternativas formado por la absorción y la adsorción.

Los resultados muestran que ambos métodos coinciden en señalar a la adsorción como la alternativa mejor posicionada. En AHP, la adsorción resulta ganadora al obtener la mayor puntuación global ponderada, mientras que en VIKOR se identifica dentro de la solución de compromiso, estando próxima a la solución ideal. No obstante, el hecho de que la absorción forme parte del conjunto de compromiso indica que su desempeño es competitivo y cercano al de la adsorción.

4.3 Análisis de sensibilidad

Para comprobar la robustez de los resultados obtenidos, se realiza un análisis de sensibilidad orientado a estudiar el efecto de posibles variaciones en la ponderación de los criterios. Dado que ambos métodos dependen de los pesos asignados, resulta necesario comprobar hasta qué punto modificaciones razonables en su importancia relativa pueden alterar la clasificación final de las alternativas.

Para ello, se ha llevado a cabo variando el peso de cada criterio en $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$, y normalizando posteriormente el conjunto de pesos. A partir de estas variaciones se han recalculado tanto las puntuaciones globales del método AHP como los índices de compromiso del método VIKOR, permitiendo analizar la estabilidad del ranking y la consistencia de las soluciones de compromiso.

Sea w_j la ponderación original del criterio j . La nueva ponderación modificada w'_j se obtiene aplicando la variación porcentual correspondiente:

$$w'_j = w_j + (w_j \cdot \Delta) \quad (4-3)$$

En la anterior expresión, Δ representa el porcentaje de variación expresado en forma decimal. Es decir, $\Delta = 0,10$ para un incremento del 10% y $\Delta = -0,10$ para una reducción del 10% .

Una vez modificada la ponderación del criterio, es necesario ajustar el resto de los pesos para que la suma total siga siendo igual a la unidad. Para ello, se define un factor de ajuste F , calculado como:

$$F = \frac{1 - w'_j}{1 - w_j} \quad (4-4)$$

Este factor se aplica a las demás ponderaciones originales w_k (con $k \neq j$) de la siguiente manera:

$$w'_k = w_k \cdot F \quad (4-5)$$

Así, se garantiza que:

$$w'_j + \sum_{k \neq j} w'_k = 1 \quad (4-6)$$

EVALUACIÓN MULTICRITERIO DE TECNOLOGÍAS DE CAPTURA DE
CO₂ MEDIANTE MÉTODOS DE ANÁLISIS DE DECISIÓN

Las siguientes tablas muestran las nuevas ponderaciones aplicando un incremento del $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ al peso de cada criterio. En cada columna se modifica únicamente el criterio correspondiente, recalculándose el resto de las ponderaciones proporcionalmente mediante el factor de ajuste F indicado, garantizando en todos los casos que la suma total permanezca igual a la unidad.

+ 10 %							
CRITERIOS	NUEVAS PONDERACIONES MODIFICANDO:						
	EF	CE	CT	IA	MT	ES	SE
	(F = 0,9461)	(F = 0,9689)	(F = 0,9811)	(F = 0,9882)	(F = 0,9925)	(F = 0,9952)	(F = 0,9967)
EF	0,3854	0,3395	0,3438	0,3463	0,3478	0,3487	0,3492
CE	0,2247	0,2612	0,2330	0,2347	0,2357	0,2363	0,2367
CT	0,1504	0,1540	0,1749	0,1571	0,1578	0,1582	0,1584
IA	0,0999	0,1023	0,1036	0,1161	0,1048	0,1050	0,1052
MT	0,0659	0,0675	0,0683	0,0688	0,0766	0,0693	0,0694
ES	0,0437	0,0447	0,0453	0,0456	0,0458	0,0508	0,0460
SE	0,0301	0,0308	0,0312	0,0314	0,0316	0,0316	0,0350
TOTAL	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Tabla 4-14 Modificación de los pesos de los criterios aplicando +10%

- 10 %							
CRITERIOS	NUEVAS PONDERACIONES MODIFICANDO:						
	EF	CE	CT	IA	MT	ES	SE
	(F = 1,0539)	(F = 1,0311)	(F = 1,0189)	(F = 1,0118)	(F = 1,0075)	(F = 1,0048)	(F = 1,0033)
EF	0,3154	0,3613	0,3570	0,3545	0,3530	0,3521	0,3515
CE	0,2503	0,2137	0,2420	0,2403	0,2393	0,2386	0,2383
CT	0,1675	0,1639	0,1431	0,1608	0,1602	0,1597	0,1595
IA	0,1113	0,1088	0,1076	0,0950	0,1063	0,1061	0,1059
MT	0,0734	0,0718	0,0710	0,0705	0,0627	0,0700	0,0699
ES	0,0487	0,0476	0,0470	0,0467	0,0465	0,0415	0,0463
SE	0,0335	0,0328	0,0324	0,0322	0,0320	0,0320	0,0286
TOTAL	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Tabla 4-15 Modificación de los pesos de los criterios aplicando -10%

+ 20 %							
CRITERIOS	NUEVAS PONDERACIONES MODIFICANDO:						
	EF	CE	CT	IA	MT	ES	SE
	(F = 0,8921)	(F = 0,9377)	(F = 0,9811)	(F = 0,9764)	(F = 0,9850)	(F = 0,9903)	(F = 0,9934)
EF	0,4205	0,3286	0,3438	0,3421	0,3452	0,3470	0,3481
CE	0,2119	0,2850	0,2330	0,2319	0,2339	0,2352	0,2359
CT	0,1418	0,1491	0,1749	0,1552	0,1566	0,1574	0,1579
IA	0,0942	0,0990	0,1036	0,1267	0,1040	0,1045	0,1049
MT	0,0621	0,0653	0,0683	0,0680	0,0836	0,0690	0,0692
ES	0,0412	0,0433	0,0453	0,0451	0,0455	0,0554	0,0459
SE	0,0284	0,0298	0,0312	0,0310	0,0313	0,0315	0,0382
TOTAL	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Tabla 4-16 Modificación de los pesos de los criterios aplicando +20%

- 20 %							
CRITERIOS	NUEVAS PONDERACIONES MODIFICANDO:						
	EF	CE	CT	IA	MT	ES	SE
	(F = 1,1079)	(F = 1,0623)	(F = 1,0378)	(F = 1,0236)	(F = 1,0150)	(F = 1,0097)	(F = 1,0066)
EF	0,2803	0,3722	0,3636	0,3587	0,3556	0,3538	0,3527
CE	0,2631	0,1900	0,2464	0,2431	0,2410	0,2398	0,2390
CT	0,1761	0,1689	0,1272	0,1627	0,1613	0,1605	0,1600
IA	0,1169	0,1121	0,1095	0,0844	0,1071	0,1066	0,1063
MT	0,0772	0,0740	0,0723	0,0713	0,0557	0,0703	0,0701
ES	0,0511	0,0490	0,0479	0,0473	0,0469	0,0369	0,0465
SE	0,0352	0,0338	0,0330	0,0325	0,0323	0,0321	0,0254
TOTAL	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Tabla 4-17 Modificación de los pesos de los criterios aplicando -20%

4.3.1 Análisis de sensibilidad en AHP

Con el objetivo de evaluar la estabilidad de la clasificación obtenida mediante el método AHP, se analiza el efecto que producen variaciones individuales en la ponderación de cada criterio sobre el ranking final de las alternativas. Los resultados recalculados se obtienen de la misma manera que como se muestra en la Tabla 4-9, es decir multiplicando los vectores de prioridad por los nuevos pesos obtenidos para cada situación.

La Tabla 4-18 recoge los nuevos resultados obtenidos de cada alternativa tras aplicar variaciones del $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ a los distintos criterios. Estos valores permiten evaluar directamente el impacto de la modificación de cada criterio sobre el resultado global del método AHP.

Δ	Alternativas	Nuevos resultados aplicando Δ a:						
		EF	CE	CT	IA	MT	ES	SE
+10%	Absorción	0,2461	0,2409	0,2442	0,2423	0,2465	0,2458	0,2441
	Adsorción	0,2671	0,2743	0,2783	0,2720	0,2729	0,2730	0,2734
	Membranas	0,2436	0,2595	0,2501	0,2546	0,2512	0,2516	0,2524
	Criogenización	0,2432	0,2252	0,2274	0,2311	0,2294	0,2296	0,2301
-10%	Absorción	0,2425	0,2477	0,2444	0,2463	0,2421	0,2429	0,2445
	Adsorción	0,2792	0,2720	0,2680	0,2744	0,2735	0,2733	0,2729
	Membranas	0,2605	0,2446	0,2540	0,2495	0,2529	0,2525	0,2517
	Criogenización	0,2178	0,2357	0,2336	0,2298	0,2316	0,2313	0,2309
+20%	Absorción	0,2479	0,2376	0,2442	0,2403	0,2488	0,2472	0,2440
	Adsorción	0,2611	0,2754	0,2783	0,2708	0,2726	0,2729	0,2737
	Membranas	0,2352	0,2670	0,2501	0,2572	0,2504	0,2511	0,2527
	Criogenización	0,2559	0,2200	0,2274	0,2317	0,2283	0,2288	0,2297
-20%	Absorción	0,2408	0,2510	0,2445	0,2483	0,2399	0,2414	0,2447
	Adsorción	0,2853	0,2709	0,2629	0,2756	0,2738	0,2735	0,2727
	Membranas	0,2689	0,2371	0,2559	0,2469	0,2537	0,2530	0,2514
	Criogenización	0,2051	0,2409	0,2367	0,2292	0,2327	0,2322	0,2313

Tabla 4-18 Nuevos resultados de AHP aplicando los distintos porcentajes a los criterios

Para visualizar de forma clara las variaciones introducidas, se representa gráficamente la evolución del ranking en cada escenario analizado. En las siguientes figuras, el eje horizontal recoge el criterio cuya ponderación ha sido modificada, mientras que el eje vertical indica su puesto en el ranking. Cada línea representa una alternativa, correspondiéndose con los colores indicados en la leyenda.

Estas gráficas facilitan la identificación de posibles variaciones en el liderazgo del ranking, así como la detección de alternativas cuya posición pueda verse afectada por cambios en la ponderación, constituyendo una herramienta visual complementaria al análisis numérico presentado anteriormente. Cabe destacar que la adsorción se mantiene en el primer puesto en todos los escenarios analizados, lo que refuerza la robustez de la solución obtenida.

En la Figura 4-2 a), correspondiente al incremento del 10 %, se observan variaciones cuando se aumenta la ponderación de la eficiencia, subiendo un puesto la absorción y la criogenización (alternativas con buenas puntuaciones en dicho criterio) a costa de las membranas que baja a la última posición. En el escenario de reducción del 10 %, mostrado en la Figura 4-2 b) no ocurre ninguna variación en el ranking.

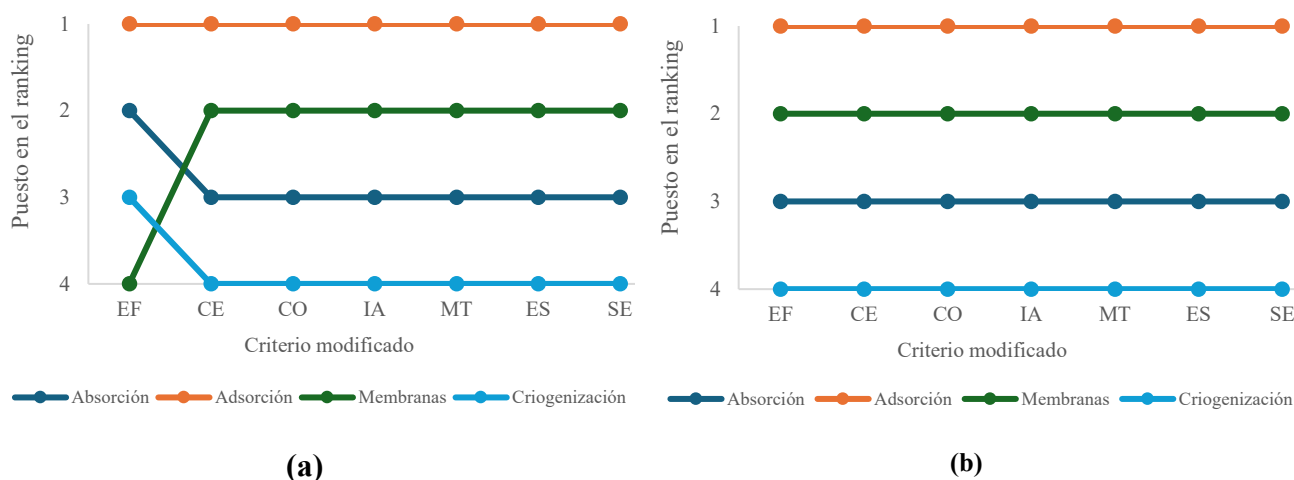


Figura 4-2 Variación del ranking aplicando: a) +10%, b) -10%

Cuando se aumenta +20%, los resultados son muy parecidos que al aplicar +10%, aunque en este caso la criogenización, que es la mejor alternativa en términos de eficiencia, llega a alcanzar la segunda posición y por tanto las membranas caen al último lugar y la absorción se mantiene constante en el tercer puesto. Cuando el análisis de sensibilidad se realiza disminuyendo un 20%, los cambios se observan al aplicar dicha reducción al impacto ambiental, donde se intercambian las posiciones de la absorción y de las membranas. Esto se debe a que las membranas destacaban en dicho criterio, por lo que al reducir su peso disminuye su ventaja relativa. Estas variaciones vienen reflejadas en la Figura 4-3.

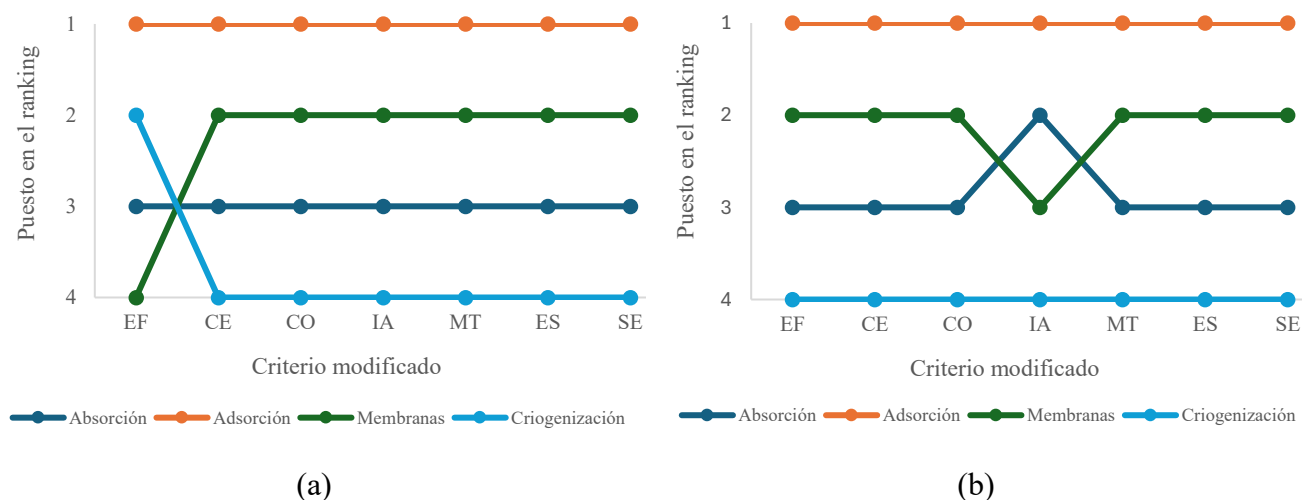


Figura 4-3 Variación del ranking aplicando: a) +20%, b) -20%

Con el fin de sintetizar estas variaciones, se presenta en la Tabla 4-19 un resumen que recoge el número de veces que cada alternativa ocupa cada posición en los 28 escenarios planteados.

	N.º de veces 1º	N.º de veces 2º	N.º de veces 3º	N.º de veces 4º
Absorción	0	2	26	0
Adsorción	28	0	0	0
Membranas	0	25	1	2
Criogenización	0	1	1	26

Tabla 4-19 Frecuencia de posiciones en el ranking

De las Tabla 4-19 y la tabla anterior se extrae que, en 25 escenarios de los 28 presentados se mantienen las posiciones obtenidas con los resultados originales, lo que confirma que el modelo AHP presenta estabilidad estructural y que los escasos cambios observados tienen lógica pues se corresponden a variaciones a la ponderación de criterios donde alternativas presentan ventajas o desventajas significativas. Además, la adsorción mantiene la primera posición siempre, lo que evidencia su solidez y robustez frente a modificaciones y frente al resto de alternativas.

4.3.2 Análisis de sensibilidad en VIKOR

A diferencia del análisis realizado en el método AHP, donde la sensibilidad se evalúa observando posibles cambios en el ranking final, en el caso del método VIKOR el estudio se centra en analizar la variación del índice de compromiso Q_i y en comprobar si dichas modificaciones afectan a la identificación de la solución de compromiso.

La Tabla 4-20 recoge los nuevos valores de Q_i para cada alternativa en función del criterio cuya ponderación ha sido modificada aplicando las variaciones del $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$. Para recalcular todos estos valores se han vuelto a aplicar las fórmulas descritas en el apartado 3.2, es decir el cálculo de la normalización y valores de la medida de utilidad y arrepentimiento con las nuevas ponderaciones.

Δ	Alternativas	Nuevos valores de Q_i aplicando Δ a:						
		EF	CE	CT	IA	MT	ES	SE
+10%	Absorción	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	Adsorción	0,3270	0,2040	0,2736	0,2464	0,2522	0,2611	0,2559
	Membranas	0,9271	0,7688	0,8242	0,8015	0,8177	0,8190	0,8170
	Criogenización	0,6793	0,7859	0,7284	0,7284	0,7284	0,7284	0,7284
-10%	Absorción	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	Adsorción	0,1875	0,3082	0,2422	0,2714	0,2654	0,2563	0,2616
	Membranas	0,7373	0,8738	0,8161	0,8396	0,8231	0,8217	0,8237
	Criogenización	0,8030	0,6834	0,7284	0,7284	0,7284	0,7284	0,7284
+20%	Absorción	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	Adsorción	0,3742	0,1548	0,2877	0,2487	0,2605	0,2811	0,2684
	Membranas	1,0000	0,7396	0,8453	0,8048	0,8370	0,8443	0,8366
	Criogenización	0,5670	0,8617	0,7284	0,7284	0,7284	0,7284	0,7284
-20%	Absorción	0,0206	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	Adsorción	0,1185	0,3612	0,2412	0,3003	0,2879	0,2663	0,2792
	Membranas	0,6843	0,9543	0,8377	0,8832	0,8495	0,8418	0,8492
	Criogenización	0,9297	0,6328	0,7284	0,7284	0,7284	0,7284	0,7284

Tabla 4-20 Nuevos resultados de VIKOR aplicando los distintos porcentajes a los criterios

Como puede observarse en la Tabla 4-20, la alternativa más próxima a la solución ideal no varía en ninguno de los 28 escenarios, manteniéndose la absorción como la opción con menor valor de Q_i . Además, en prácticamente todos los casos presenta un $Q_i = 0$, a excepción de la reducción en un 20% a la eficiencia en el caso de la absorción, que presenta un valor muy próximo (0,0206). Esto confirma que continúa siendo la referencia ideal dentro del modelo y que cumple automáticamente la condición de estabilidad, al tener también los menores valores en la medida de utilidad y/o arrepentimiento.

No obstante, la composición de la solución de compromiso sí experimenta ligeras variaciones. En dos escenarios (aumento de la eficiencia y reducción del consumo energético en un 20%), el valor del índice de compromiso de la adsorción supera el umbral de ventaja aceptable establecido en 0,3333 lo que implica que la absorción pasa a cumplir por sí sola la condición de ventaja aceptable. En estos casos, la solución de compromiso deja de estar formada por dos alternativas (absorción y adsorción) y queda constituida únicamente por la absorción.

Este comportamiento se observa en dos escenarios concretos: cuando se incrementa en un 20 % la ponderación del criterio eficiencia, y cuando se reduce en un 20 % la ponderación del consumo energético. Este comportamiento se debe a que la absorción presenta un mejor desempeño en eficiencia, mientras que la adsorción destaca en consumo energético. Al aumentar el peso de la eficiencia o reducir el del consumo, se amplía la ventaja relativa de la absorción.

En el resto de los escenarios, la diferencia entre la absorción y la adsorción no alcanza el umbral requerido, manteniéndose ambas dentro del conjunto de compromiso.

Estos resultados ponen de manifiesto que, incluso bajo distintas condiciones de ponderación, las tecnologías convencionales analizadas presentan un comportamiento competitivo y complementario, sin que exista una alternativa claramente dominante en todos los criterios.

Hasta ahora, el estudio se ha centrado en la captura de CO₂ desde corrientes gaseosas procedentes de procesos industriales, cuyo objetivo principal es evitar la emisión de nuevas cantidades de dióxido de carbono a la atmósfera. Sin embargo, estas tecnologías no son suficientes para cumplir los objetivos internacionales de mitigación del cambio climático, lo que ha impulsado el desarrollo de tecnologías emergentes cuyo enfoque es diferente. En lugar de limitarse a la prevención de nuevas emisiones, estas tecnologías permiten capturar el dióxido de carbono ya presente en la atmósfera. Este tipo de captura se conoce como DAC (del inglés: Direct Air Capture), cuyo desarrollo y potencial se analizarán en el siguiente capítulo.

5 NUEVAS ESTRATEGIAS DE CAPTURA

En este capítulo se introduce una tecnología emergente de captura de dióxido de carbono que, debido a su creciente relevancia en la lucha contra el cambio climático, no podía quedar fuera del presente Trabajo de Fin de Grado. Se trata de la tecnología conocida como DAC, la cual propone capturar el CO₂ directamente del aire. Debido a esta diferencia, no ha sido incluida en el análisis multicriterio realizado, ya que no se trata de una tecnología de postcombustión y su comparación directa con las alternativas estudiadas no sería metodológicamente adecuada.

El objetivo de este capítulo es presentar los fundamentos de esta tecnología, analizar sus características principales y poner de manifiesto su relevancia actual, así como su potencial para futuros desarrollos en el ámbito de la captura de carbono.

5.1 Introducción a la tecnología DAC

5.1.1 Definición y concepto

La DAC está diseñada para extraer dióxido de carbono directamente del aire atmosférico mediante procesos químicos o fisicoquímicos. A diferencia de las tecnologías convencionales de captura de carbono, que se aplican a corrientes con concentraciones elevadas de CO₂ procedentes de instalaciones industriales, DAC está diseñada para capturar el gas presente en el aire, donde su concentración es considerablemente menor [58].

Una de las principales razones del creciente interés por la tecnología DAC es su capacidad para contribuir a la reducción de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. A diferencia de otras tecnologías de captura que se centran en evitar nuevas emisiones, la DAC permite eliminar parte del CO₂ ya acumulado, incluyendo las denominadas emisiones heredadas. Por este motivo, diversos estudios consideran que estas tecnologías pueden desempeñar un papel relevante dentro de las estrategias de mitigación del cambio climático pues pueden contribuir a alcanzar la neutralidad climática o incluso generar emisiones negativas [58].

El desarrollo de esta tecnología comenzó en 1999, cuando el ingeniero alemán Klaus Lackner (Figura 5-1) propuso por primera vez la posibilidad de extraer dióxido de carbono directamente de la atmósfera mediante materiales capaces de capturarlo selectivamente [59]. Durante las primeras décadas su desarrollo se limitó principalmente al ámbito teórico y experimental, centrado en la investigación de nuevos materiales y procesos de captura. Sin embargo, en los últimos años el interés por esta tecnología ha crecido de forma notable, impulsando la aparición de empresas especializadas y el desarrollo de plantas piloto y proyectos industriales en distintas regiones del mundo.

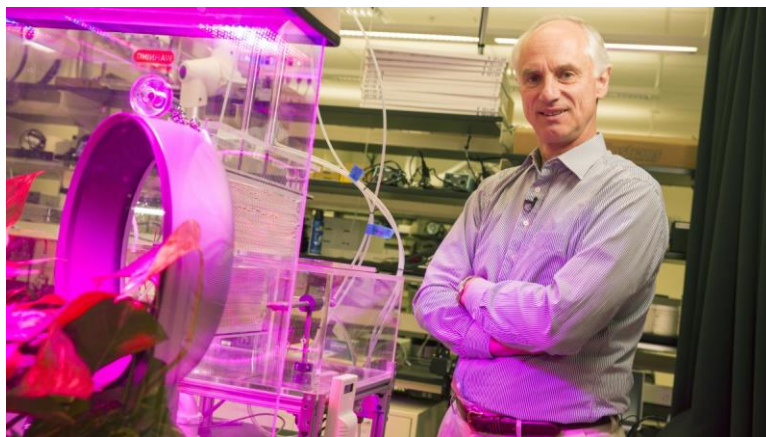


Figura 5-1 Klaus Lackner junto con su prototipo de DAC [59]

5.1.2 Ventajas y limitaciones

Entre las principales ventajas de la captura directa de aire destaca su elevada flexibilidad de implementación, ya que las instalaciones pueden ubicarse en diferentes regiones sin depender de la presencia de fuentes de emisión [60].

Otro aspecto positivo es que al igual que las tecnologías analizadas en postcombustión, el dióxido de carbono capturado puede ser posteriormente almacenado de forma permanente en formaciones geológicas o reutilizado en distintos procesos industriales, como la producción de combustibles sintéticos o materiales químicos [60].

No obstante, también presenta importantes limitaciones. La baja concentración de CO₂ en el aire ($\approx 0,04\%$) implica que los procesos de captura tengan que mover grandes volúmenes de aire a través de los sistemas de captación, lo que conlleva un mayor consumo energético en comparación con otras tecnologías de captura aplicadas a corrientes de gases más concentradas (4-15%) [60].

Otro punto negativo son los costes operativos de las instalaciones DAC. Estos costes son muy elevados debido a los procesos de regeneración de los materiales capturadores, los cuales requieren alta demanda de energía térmica o eléctrica adicional [61].

A pesar de estos desafíos, el desarrollo de nuevos materiales capturadores, el avance de los procesos de regeneración y el aumento del interés institucional han impulsado un gran crecimiento en investigación en los últimos años por lo que estas desventajas pueden tener un carácter menos significativo en el futuro [61].

5.2 Funcionamiento y tipos de DAC

5.2.1 Etapas del proceso

Aunque existen diversos tipos de captura directa de aire con diferentes características, todas ellas comparten el mismo proceso general, el cual puede dividirse en tres etapas principales: contacto, captura y separación [60].

En la primera etapa, denominada etapa de contacto, el aire atmosférico que contiene dióxido de carbono es conducido hacia el sistema de captura mediante ventiladores de gran capacidad [60].

Durante la etapa de captura, el CO₂ presente en el aire entra en contacto con el material capturador capaz de fijar selectivamente el dióxido de carbono. Dependiendo del tipo de tecnología este material puede consistir en disolventes líquidos en reactores químicos o en adsorbentes sólidos dispuestos en filtros [60].

En la última fase, conocida como etapa de separación, se aplica energía externa en forma de calor o electricidad para liberar el CO_2 retenido en el material. Este proceso (Figura 5-2) permite obtener una corriente concentrada de dióxido de carbono, al mismo tiempo que el disolvente o adsorbente se regenera para poder reutilizarse en ciclos posteriores de captura [60].

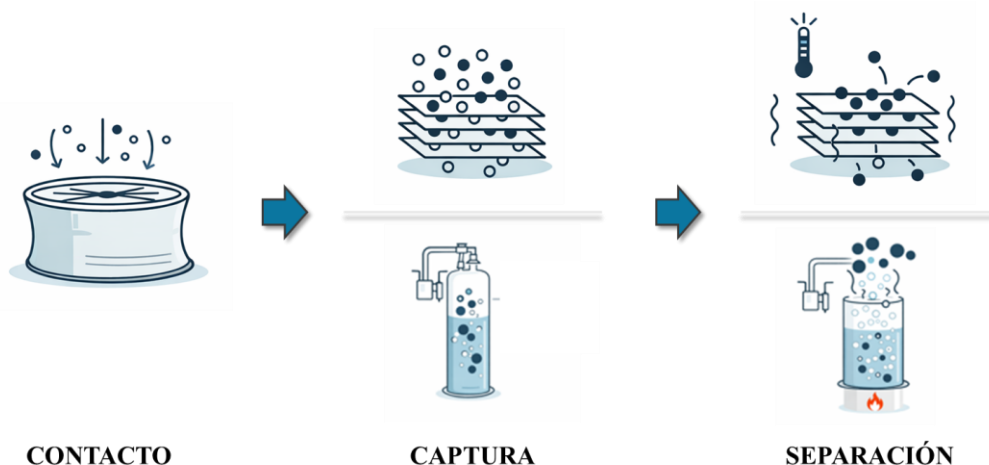


Figura 5-2 Esquema general del proceso DAC (autoría propia, basado en [60])

Una vez separado, el CO_2 puede ser transportado para su almacenamiento permanente o para su utilización en diferentes aplicaciones industriales.

5.2.2 Tecnologías DAC existentes

5.2.2.1 Tecnología basada en solución acuosa a alta temperatura

La tecnología L-DAC (Liquid Direct Air Capture) destaca como la técnica DAC más madura entre las actuales. Su funcionamiento se basa en la reacción química entre el dióxido de carbono y una solución alcalina, lo que da lugar a productos químicos específicos. Las principales soluciones alcalinas son el hidróxido de potasio (KOH) y el hidróxido de sodio (NaOH) [62]. El proceso completo puede dividirse en dos circuitos químicos cerrados, reflejados en la Figura 5-3.

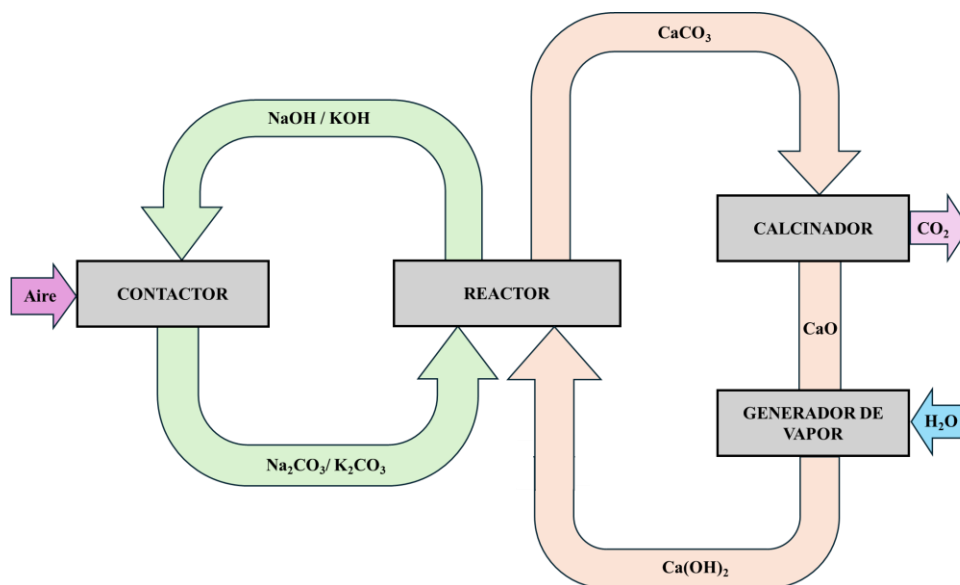
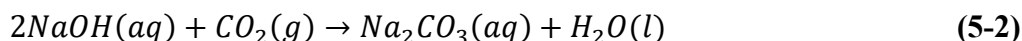
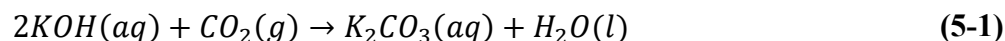
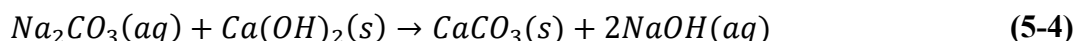
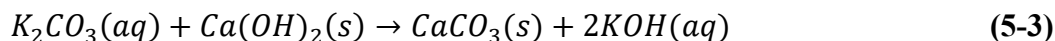


Figura 5-3 Diagrama esquemático de los procesos L-DAC (autoría propia)

En el primer circuito, el CO_2 atmosférico entra en contacto con la solución alcalina produciéndose reacciones de neutralización y generando carbonatos disueltos en el líquido, tal y como se muestra en las reacciones (5-1) y (5-2) para soluciones basadas en KOH y NaOH [58].



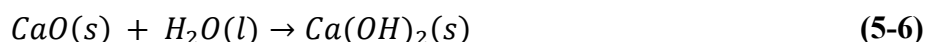
En el segundo circuito, se separa el CO₂ capturado y se regenera el disolvente. Para ello se añade hidróxido de calcio (Ca(OH)₂), que reacciona con los carbonatos para producir carbonato cálcico sólido (CaCO₃) [58]. Este proceso viene representado en las reacciones (5-3) y (5-4).



Posteriormente, el carbonato cálcico sólido se introduce en el calcinador donde se somete a muy altas temperaturas (900 °C), donde (como viene reflejado en la reacción 5-5) se descompone produciendo CO₂ gaseoso puro y óxido de calcio (CaO) [58].



Finalmente, la reacción 5-6 representa como el óxido de calcio reacciona con vapor de agua a 300 °C para regenerar el hidróxido de calcio. De esta manera se cierra el circuito y por tanto se permite su reutilización en el proceso [58].



La ventaja significativa de las tecnologías L-DAC, radica en su capacidad para garantizar la reposición continua de la solución alcalina dentro de los contactores a gran escala. Esto garantiza procesos de captura de CO₂ ininterrumpidos y estables. Sin embargo, a pesar de que las reacciones que tienen lugar en el contactor y en el reactor es de aproximadamente 20 °C., aquellas que suceden en el calcinador y el apagador de vapor requieren temperaturas de funcionamiento muy altas. Estos requisitos de alta temperatura, junto con la necesidad de fuentes de agua adicionales para la regeneración continua del disolvente, aumentan los costes operativos, lo que representa un inconveniente notable [62].

5.2.2.2 Tecnología basada en adsorbentes sólidos a baja temperatura

La tecnología S-DAC (Solid Direct Air Capture) funciona bajo dos fases diferenciadas. La fase operacional que consiste en filtrar el aire a través de adsorbentes sólidos para capturar CO₂ a temperatura ambiente y presión atmosférica. Posteriormente, en la fase de regeneración, el gas se libera de los adsorbentes a baja presión y temperaturas moderadas (80-100 °C) mediante un proceso de oscilación de temperatura y vacío [63]. El flujo del proceso de esta tecnología se ilustra en la Figura 5-4.

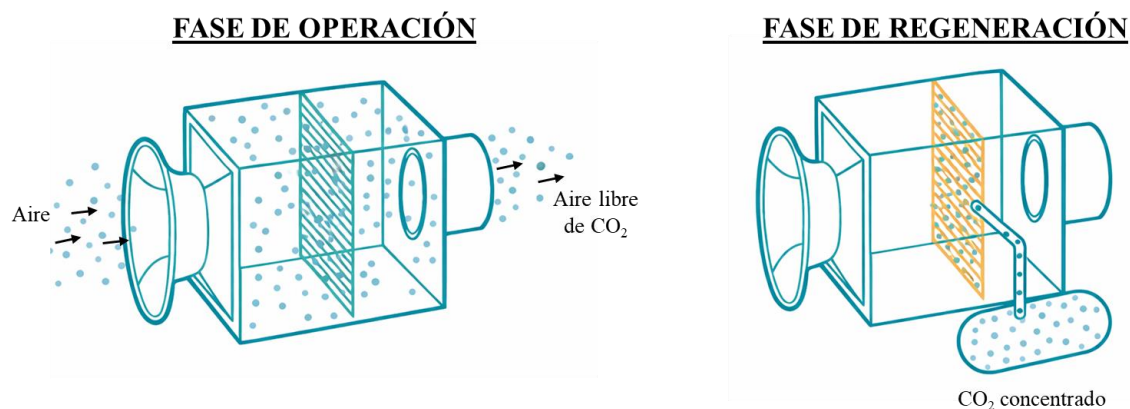


Figura 5-4 Flujo del proceso de la tecnología S-DAC

En las aplicaciones actuales de S-DAC, los adsorbentes sólidos son materiales porosos con grupos químicos de carácter alcalino, entre los que destacan especialmente los grupos amina [64], grupos

hidroxilo [64], amonio cuaternario [65] o piperidina [66]. Estos materiales se fijan normalmente sobre filtros o soportes porosos que permiten el paso del aire a través de ellos.

En el proceso de captura, el aire se impulsa hacia los colectores mediante ventiladores y el CO₂ presente en el aire se une a estos adsorbentes, en especial a los basados en aminas, que son los más utilizados debido a su alta reactividad y estabilidad en condiciones de baja concentración de CO₂ [61].

Cuando se saturan los adsorbentes, se apagan los ventiladores, se cierra la válvula de entrada y el aire restante se expulsa opcionalmente mediante una caída de presión, aspirando o introduciendo vapor en el sistema. A continuación, se produce la regeneración calentando el sistema a una temperatura en torno a 80 y 100 °C, dependiendo del adsorbente. El CO₂ liberado se recoge y se transporta fuera del sistema para su purificación, compresión o utilización [61].

La tecnología S-DAC ofrece ventajas como un bajo consumo energético y bajos costes operativos en comparación con L-DAC debido a sus diferentes requerimientos de temperatura. Como aspectos negativos, esta tecnología se basa en operaciones por lotes, lo que requiere que se operen varias unidades en paralelo, lo que da lugar a estructuras de planta más grandes y complejas y a un aumento de los costes de construcción. Además, los adsorbentes deben soportar una exposición prolongada a entornos impuros por lo que pueden sufrir una degradación obligando a ser sustituidos periódicamente [58].

En la Tabla 5-1 se muestra la comparación directa entre las dos tecnologías de captura directa del aire que se han desarrollado.

Tecnologías	Principios	Materiales comúnmente empleados	Ventajas	Desventajas
L-DAC	El disolvente líquido reacciona con el CO ₂ para formar carbonatos para su captura, y libera el gas al calentarse	Soluciones alcalinas	Operación a gran escala Estable y sin interrupciones	Requisito de alta temperatura Alto consumo energético Requisito de equipos resistentes a la corrosión
S-DAC	El adsorbente sólido captura CO ₂ , y luego lo libera mediante un proceso de oscilación de temperatura y vacío	Adsorbentes basados en aminas	Operaciones modulares y escalables Menor consumo energético que L-DAC	Operaciones por lotes que provocan estructuras complejas en la planta Altos costes de construcción

Tabla 5-1 Comparación entre L-DAC y S-DAC [58]

5.2.2.3 Otras tecnologías emergentes

Además de las tecnologías L-DAC y S-DAC, se han propuesto otras alternativas para la captura directa de CO₂ del aire que todavía se encuentran en fases tempranas de investigación. Estas tecnologías buscan principalmente reducir el consumo energético del proceso, los costes o simplificar las etapas de captura y regeneración. Entre las más destacadas se encuentran las siguientes:

- La adsorción por oscilación eléctrica (ESA) utiliza materiales electroquímicos capaces de capturar y liberar CO₂ mediante la aplicación de una corriente eléctrica [67].

- La adsorción por oscilación de humedad (MSA) se basa en el uso de materiales adsorbentes sensibles a la humedad. En condiciones secas estos materiales capturan CO₂ del aire, mientras que al aumentar la humedad ambiental liberan el CO₂ capturado [68].
- Los sistemas de captura basados en membranas (m-DAC) utilizan membranas selectivas que separan el CO₂ del resto del aire. Actúan como barreras semipermeables que facilitan el paso preferente del dióxido de carbono, concentrándolo en una corriente separada [69].

5.3 Estado actual de la tecnología

Las primeras instalaciones de captura directa de aire comenzaron a desarrollarse a escala piloto durante la década de 2010. En 2017 la empresa suiza Climeworks puso en funcionamiento en Hinwil (Suiza) la primera planta comercial [70]. En la Figura 5-5 aparecen los fundadores de la empresa junto con el sistema DAC desarrollado.

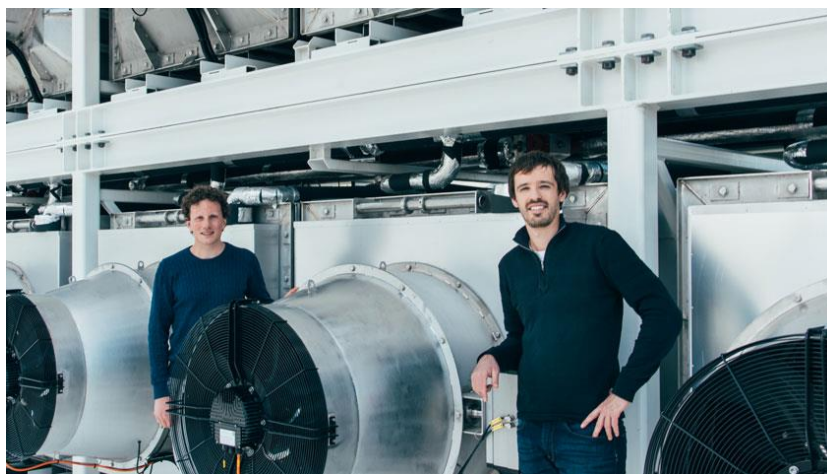


Figura 5-5 Christoph Gebald y Jan Wurzbacher, fundadores de Climeworks [70]

La empresa Climeworks siguió expandiendo esta tecnología y a día de hoy sus plantas más destacadas se encuentran en Islandia. Estas instalaciones son las denominadas Arctic Fox, Orca y Mammoth (Figura 5-6), inauguradas en 2018, 2021 y 2024 respectivamente. La última, representa uno de los proyectos de DAC de mayor escala construidos hasta la fecha y todas ellas emplean tecnologías basadas en S-DAC [71].

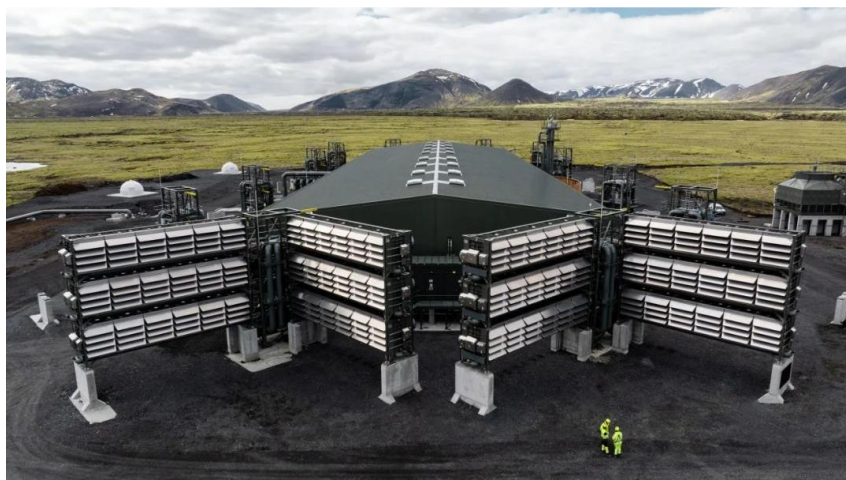


Figura 5-6 Planta DAC Mammoth, Islandia [71]

La razón por la que se encuentran estas instalaciones en Islandia es por la actividad volcánica de la isla que hace que los subsuelos estén compuestos mayoritariamente de basaltos, rocas con propiedades

favorables para el almacenamiento de CO₂. Es por ello por lo que el gas capturado puede ser derivado a su utilización o bien se almacena de forma permanente mediante procesos de mineralización geológica. Para inyectar en el subsuelo el CO₂ capturado, Climeworks opera conjuntamente con otra compañía, Carbfix [72].

Según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), existen alrededor de 30 plantas DAC operativas en todo el mundo, localizadas principalmente en Europa [73]. Las principales plantas existentes junto con su localización, la empresa a la que pertenece y sus datos de captura se disponen en la Tabla 5-2.

Planta	Ubicación	Empresa	Capacidad de captura
Mammoth	Islandia	Climeworks	36000 tCO ₂ /año
Orca	Islandia	Climeworks	4000 tCO ₂ /año
Planta de demostración de Global Thermostat	Colorado, EE. UU.	Global Thermostat	≈4000 tCO ₂ /año
Capricorn	Suiza	Climeworks	≈300 tCO ₂ /año
Planta piloto de Skytree	Países Bajos	Skytree	≈100 tCO ₂ /año
Planta piloto de Antecy	Países Bajos	Antecy	≈100 tCO ₂ /año
Arctic Fox	Islandia	Climeworks	50 tCO ₂ /año

Tabla 5-2 Principales plantas DAC actualmente en funcionamiento [58]

A pesar de que las plantas actualmente operativas presentan capacidades de captura relativamente bajas, existen numerosas instalaciones de mayor escala que se encuentran actualmente en fase de desarrollo. Según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), existen más de 130 proyectos en distintas etapas de planificación o construcción, localizados principalmente en Estados Unidos, Japón, Europa y Oriente Medio y muchos de ellos se espera que entren en funcionamiento antes de 2030 [73].

La mayoría de estos proyectos se basan en tecnologías L-DAC, cuyo potencial permite alcanzar capacidades de captura muy superiores a las de lo existente actualmente. Esto pone de manifiesto el rápido crecimiento que está experimentando la captura directa del aire [73].

Un ejemplo representativo es el proyecto Oxy-CE (Figura 5-7), ubicado en Texas y desarrollado por 1PointFive y Carbon Engineering, que prevé alcanzar una capacidad de captura de aproximadamente 30 Mt de CO₂ al año, lo que supondría un salto significativo en DAC [74].

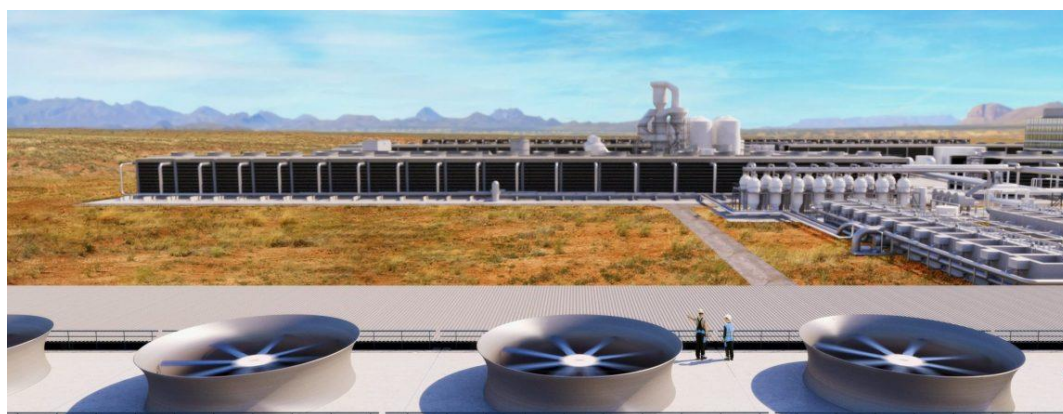


Figura 5-7 Boceto de la planta DAC del proyecto Oxy-CE [74]

5.4 Posicionamiento frente a las tecnologías de captura convencionales

5.4.1 Diferencias entre DAC y las tecnologías analizadas

En comparación con la captura sobre fuentes puntuales de CO₂ de alta concentración, como refinerías, centrales eléctricas o fábricas de cemento, la captura directa del aire requiere un mayor suministro de energía, materiales más eficaces y mucho mayor coste [61].

Se estima que el consumo energético de los sistemas DAC se sitúa aproximadamente entre 8 y 12 GJ por tonelada de CO₂ capturado. En cuanto a los costes, las estimaciones actuales varían debido al carácter emergente de la tecnología, su localización y la fuente de energía de regeneración, situándose generalmente entre 100 y 600 USD por tonelada de CO₂ capturado [20]. Se espera que estos costes disminuyan de forma significativa en las próximas décadas a medida que la tecnología alcance mayores niveles de desarrollo y se despliegue a mayor escala industrial [61].

La gran diferencia en términos de consumo energético y coste se debe principalmente a la concentración de gas que se encuentra en el aire para ser capturado. En la Tabla 5-3 se muestran los datos que ponen de manifiesto estas grandes diferencias.

Tecnología	Concentración de CO ₂	Consumo energético	Coste
Absorción química	4-15 %	3-5 GJ/tCO ₂	50-100 \$/tCO ₂
Adsorción	4-15 %	2-4 GJ/tCO ₂	30-80 \$/tCO ₂
Membranas	4-15 %	2-3 GJ/tCO ₂	60-120 \$/tCO ₂
Criogenización	4-15 %	4-6 GJ/tCO ₂	70-150 \$/tCO ₂
DAC	0,04 %	8-12 GJ/tCO₂	100-600 \$/tCO₂

Tabla 5-3 Comparación de DAC con las tecnologías analizadas [20]

Para hacer frente a estos retos y considerar en un futuro a la DAC como una opción más viable de lucha contra el cambio climático, se pueden dirigir los esfuerzos hacia la optimización del suministro de energía, el perfeccionamiento de las tecnologías, los diseños de los procesos, el refuerzo del apoyo financiero y las medidas de incentivo por parte de los gobiernos y organizaciones internacionales [58].

5.4.2 Papel en la mitigación del cambio climático

Las tecnologías de captura de dióxido de carbono desarrolladas en capítulos anteriores y la captura directa de aire no deben entenderse como soluciones excluyentes, sino como estrategias complementarias dentro de la lucha contra el cambio climático. Mientras que las primeras tratan de reducir las emisiones directamente en los puntos donde se generan, la captura directa de aire ofrece la posibilidad de eliminar dióxido de carbono ya presente en la atmósfera. Por este motivo, el desarrollo conjunto de ambas tecnologías resulta fundamental para limitar el aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera y avanzar hacia la descarbonización.

En los últimos años ha aparecido el concepto de emisiones netas cero (Net Zero), la cual se entiende como la situación en la que la cantidad de dióxido de carbono emitido a la atmósfera es equivalente a la cantidad que se captura. Diversos organismos internacionales, como el IPCC y la Agencia Internacional de la Energía, señalan que alcanzar este equilibrio es necesario para limitar el calentamiento global a 1,5 °C y se espera lograrlo aproximadamente en 2050 [60].

En este escenario, las tecnologías de captura de carbono deberán experimentar un crecimiento significativo durante las próximas décadas. La Figura 5-8 muestra una la evolución prevista del

despliegue de tecnologías de captura directa de aire junto con la reducción esperada de sus costes de inversión (CAPEX) [61].

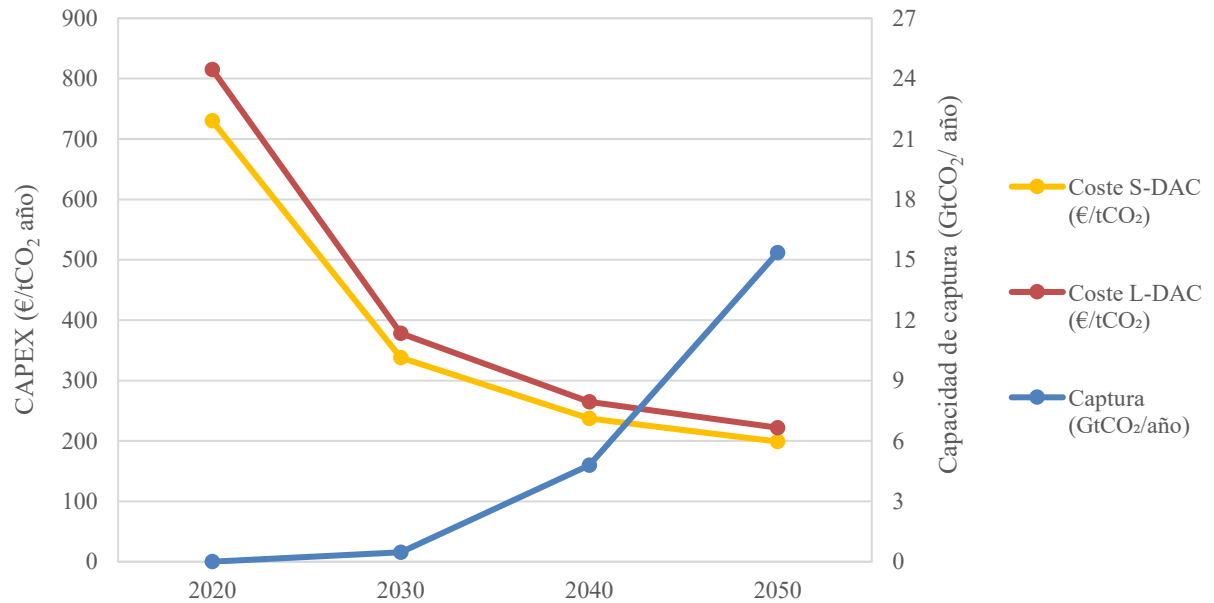


Figura 5-8 Evolución de los costes de inversión y la capacidad de captura en DAC en las próximas décadas [61]

Como puede observarse, la capacidad global de captura mediante DAC podría aumentar de forma notable hasta mediados de siglo, mientras que los costes asociados a estas tecnologías tienden a disminuir progresivamente gracias al desarrollo tecnológico y a la experiencia acumulada. Esta tendencia refleja el papel potencial de la captura directa de aire como complemento a las tecnologías de captura en fuente dentro de los futuros sistemas de mitigación del cambio climático.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este capítulo se recogen las principales conclusiones derivadas del TFG. Asimismo, se reflexiona sobre la relevancia de los resultados obtenidos en los dos métodos utilizados, AHP y VIKOR con el fin de sintetizar una clasificación definitiva de las mejores tecnologías de captura de dióxido de carbono. Finalmente, se presentan posibles líneas futuras que permitan continuar y mejorar el estudio desarrollado.

6.1 Conclusiones

En el presente trabajo se ha llevado a cabo la comparación de tecnologías de captura de dióxido de carbono mediante métodos de análisis multicriterio (AHP y VIKOR). Con la aplicación del método AHP, se obtuvo una clasificación de las alternativas basada en la comparación pareada entre ellas. Los resultados situaron a la adsorción como la mejor alternativa, seguida de membranas, absorción y, en último lugar, criogenización. Por otro lado, el método VIKOR evaluó la proximidad de las alternativas a una solución ideal considerando tanto el desempeño global como la desviación máxima en algún criterio. En este caso, la absorción se identificó como la alternativa más próxima a la solución ideal. No obstante, estuvo acompañada de la adsorción dentro de la solución de compromiso, lo que indica que ambas tecnologías presentan un comportamiento competitivo.

Para lograr dicho análisis, la selección de criterios ha sido determinante, destacando especialmente la eficiencia de captura, el consumo energético y el coste como factores clave en la evaluación. El peso asignado a cada uno de estos criterios mediante AHP ha influido en gran medida en la jerarquización final de las tecnologías en los dos métodos aplicados.

A partir de la combinación de los resultados obtenidos por ambos métodos y la aplicación de un análisis de sensibilidad variando la ponderación de los criterios, puede establecerse una clasificación final de las tecnologías analizadas. En primer lugar, se sitúa la adsorción como la alternativa más favorable, debido a su comportamiento equilibrado en el conjunto de criterios, sin presentar debilidades significativas en ninguno de ellos. Por su parte, la absorción química ocuparía la segunda posición debido a su rendimiento competitivo, destacando en eficiencia y madurez tecnológica, y llegando a constituir en solitario la solución de compromiso en determinados escenarios del análisis de sensibilidad.

La separación mediante membranas muestra un comportamiento equilibrado, aunque con un menor desempeño global, mientras que la criogenización, pese a su alta eficiencia, queda penalizada por su elevado consumo energético y coste, lo que limita su viabilidad a gran escala. Por ello, se sitúan en la tercera y la cuarta posición respectivamente.

Es importante señalar que esta clasificación debe interpretarse de manera general. En aplicaciones concretas pueden aparecer escenarios donde cambie la importancia relativa de determinados criterios o

se introduzcan nuevos factores de evaluación, lo que podría modificar la jerarquización obtenida. Por ejemplo, en situaciones donde el coste y el consumo energético no se les otorgue tanta prioridad, probablemente la criogenización resulte más adecuada.

Asimismo, se ha explorado la tecnología emergente de captura directa del aire (DAC) como una estrategia complementaria, capaz de capturar el dióxido de carbono ya presente en la atmósfera. Aunque actualmente presenta elevados costes y consumo energético, su desarrollo la posiciona como una herramienta clave para alcanzar los objetivos de emisiones netas cero.

Por último, cabe destacar la relevancia del presente trabajo pues ha permitido adquirir una visión amplia de las principales tecnologías de captura de CO₂, un aspecto de gran importancia para hacer frente al cambio climático y reducir las emisiones industriales. A su vez, el trabajo pone de manifiesto la utilidad de los métodos de análisis multicriterio como herramientas de apoyo a la toma de decisiones en ingeniería, especialmente en situaciones donde existen múltiples alternativas y numerosos criterios en conflicto que deben ser considerados de forma simultánea.

6.2 Líneas futuras

Este trabajo abre la puerta a diversas vías de investigación que podrían complementar y ampliar el estudio. Las líneas futuras que se proponen son las siguientes:

- **Aplicación a escenarios industriales específicos.** El análisis realizado tiene un carácter general pues se buscaba la comparación global. Una línea futura clave sería aplicar este modelo multicriterio a casos de estudio concretos, como una central eléctrica, una cementera o una refinería, donde la evaluación de criterios podría variar de manera significativa.
- **Realizar el análisis con otros métodos de decisión multicriterio.** Con el fin de validar y contrastar la robustez de los resultados obtenidos se propone realizar el análisis utilizando otros métodos como TOPSIS, PROMETHEE o MAUT.
- **Desarrollo de una herramienta informática de soporte a la decisión.** La evaluación de las tecnologías se ha realizado mediante el uso de Microsoft Excel. Una línea de investigación futura clave sería el desarrollo de un software que integre los algoritmos de AHP con el fin de que las empresas actualicen los datos de forma dinámica si se producen variaciones debido al desarrollo continuo de las tecnologías. De esta manera se obtendría un ranking automatizado y actualizado, convirtiéndose en un sistema de apoyo a la decisión que evite la necesidad de realizar un estudio manual ante cada cambio que pueda producirse.
- **Profundización en la cadena completa CCUS.** Extender el estudio más allá de la captura, analizando más en profundidad los requerimientos técnicos y económicos de las etapas de transporte (por tuberías o marítimo), las diferentes opciones de almacenamiento geológico (acuíferos, basalto o yacimientos agotados) y las rutas de utilización del gas capturado.
- **Evaluación multicriterio de variantes de captura directa del aire (DAC):** Una vez que las tecnologías DAC tengan una mayor implantación (tal y como está previsto a partir de 2030), sería de interés realizar una comparación entre sus diferentes alternativas, como L-DAC frente a S-DAC o las tecnologías emergentes descritas en el apartado 5.2.2.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Y. C. Leung, G. Caramanna, y M. M. Maroto-Valer, «An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, pp. 426-443, nov. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.07.093.
- [2] M. Pal, V. Karaliūtė, y S. Malik, «Exploring the Potential of Carbon Capture, Utilization, and Storage in Baltic Sea Region Countries: A Review of CCUS Patents from 2000 to 2022», *Processes*, vol. 11, n.º 2, p. 605, feb. 2023, doi: 10.3390/pr11020605.
- [3] «The Paris Agreement | UNFCCC». Accedido: 14 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [4] H. Ritchie y M. Roser, «CO₂ emissions», *Our World in Data*, jun. 2020, Accedido: 13 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>
- [5] Rebecca Lindsey, «Climate change: atmospheric carbon dioxide | NOAA Climate.gov». Accedido: 13 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>
- [6] J. Temple, «El IPCC incluye la eliminación de CO₂ en la lucha ante la crisis climática - MIT Technology Review en español». Accedido: 13 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://technologyreview.es/article/el-ipcc-incluye-la-eliminacion-de-co2-en-la-lucha-ante-la-criisis-climatica/>
- [7] «El cambio climático, en datos y gráficos». Accedido: 14 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.epdata.es/datos/cambio-climatico-datos-graficos/447>
- [8] «Global Greenhouse Gas Emissions: 1990-2021 and Preliminary 2022 Estimates». Accedido: 13 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://rhg.com/research/global-greenhouse-gas-emissions-2022/>
- [9] «Gas Power Plants in Spain (Map)», database.earth. Accedido: 13 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://database.earth/energy/power-plants/gas-power/spain>

- [10] «Emisiones de dióxido de carbono». Accedido: 13 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>
- [11] «Emisiones de CO₂ de los coches: hechos y cifras (infografía)», Temas | Parlamento Europeo. Accedido: 13 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>
- [12] «Los coches más vendidos de la historia en todo el mundo | Noticias coches.net». Accedido: 13 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.coches.net/noticias/coches-mas-vendidos-decadas>
- [13] A. Zambrano, Félix Franquis, y A. Infante, «Emisión y captura de carbono en los suelos en ecosistemas forestales», 2007.
- [14] «La Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)», Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Accedido: 14 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/naciones-unidas.html>
- [15] «United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, Brazil, 3-14 June 1992», United Nations. Accedido: 24 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/en/conferences/environment/rio1992>
- [16] «The Kyoto Protocol | UNFCCC». Accedido: 14 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol>
- [17] «Emissions Gap Report 2023 | UNEP - UN Environment Programme». Accedido: 14 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2023>
- [18] «Annual CO₂ emissions», Our World in Data. Accedido: 29 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://ourworldindata.org/grapher/annual-co2-emissions-per-country>
- [19] «CO₂ emissions per capita», Our World in Data. Accedido: 29 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://ourworldindata.org/grapher/co-emissions-per-capita>
- [20] E. Hanson, C. Nwakile, y V. O. Hammed, «Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technologies: Evaluating the effectiveness of advanced CCUS solutions for reducing CO₂ emissions», *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 18, p. 100381, 2025, doi: 10.1016/j.rsurfi.2024.100381.
- [21] E. Hamedani, A. Yajloo, y S. Talebi, «A comprehensive review on carbon capture, transportation, storage, and utilization technologies; part I: Carbon capture technologies», 2025.
- [22] T. Kim, H. Yoon, y J. Lee, «Review on carbon capture and storage (CCS) from source to sink; part 1: Essential aspects for CO₂ pipeline transportation», *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 137, p. 104208, 2024, doi: 10.1016/j.ijggc.2024.104208.
- [23] D. Rodríguez, «El transporte marítimo de CO₂, un sector en expansión para acelerar la transición energética». Accedido: 30 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.naucher.com/el-transporte-maritimo-de-co2-un-sector-en-expansion-para-acelerar-la-transicion-energetica/>

- [24] P. Oeuvray, «Multi-criteria assessment of inland and offshore carbon dioxide transport options», *Journal of Cleaner Production*, 2024.
- [25] E. Alper y O. Yuksel, «CO₂ utilization: Developments in conversion processes», *Petroleum*, vol. 3, n.º 1, pp. 109-126, 2017, doi: 10.1016/j.petlm.2016.11.003.
- [26] A. Cámara y B. Navarrete, «Captura y almacenamiento de CO₂», 2009.
- [27] «El mar del Norte almacenará millones de toneladas de CO₂», euronews. Accedido: 30 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://es.euronews.com/green/2025/11/29/el-mar-del-norte-almacenara-millones-de-toneladas-de>
- [28] «Las rocas volcánicas de Islandia logran capturar las emisiones de CO₂», Agencia SINC. Accedido: 30 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Las-rocas-volcanicas-de-Islandia-logran-capturar-las-emisiones-de-CO2>
- [29] D. Eimer, «Post-Combustion CO₂ Separation Technology Summary», *Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations*, Elsevier, 2005, pp. 91-97. doi: 10.1016/B978-008044570-0/50089-1.
- [30] A. Dubey y A. Arora, «Advancements in carbon capture technologies: A review», *Journal of Cleaner Production*, vol. 373, p. 133932, nov. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133932.
- [31] I. Ardáñez, «Captura y Almacenamiento de CO₂». Accedido: 17 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.norvento.com/blog/captura-CO2/>
- [32] E. Blanco y F. Ortega, «Tecnologías de captura de CO₂ en procesos de postcombustión de gas natural», 2019.
- [33] E. Liu, X. Lu, y D. Wang, «A Systematic Review of Carbon Capture, Utilization and Storage: Status, Progress and Challenges», *Energies*, vol. 16, n.º 6, p. 2865, mar. 2023, doi: 10.3390/en16062865.
- [34] L. Romeo y I. Bolea, «Overview Post-combustion CO₂ capture», 2015.
- [35] M. Á. Álvarez y F. Carrasco, Eds., *Aplicaciones de adsorbentes y catalizadores en procesos medioambientales y energéticos*, 1.ª ed. Universidad Internacional de Andalucía, 2016. doi: 10.56451/10334/3626.
- [36] F. Nocito y A. Dibenedetto, «Atmospheric CO₂ mitigation technologies: carbon capture utilization and storage», *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 21, pp. 34-43, 2020, doi: 10.1016/j.cogsc.2019.10.002.
- [37] R. Wanison *et al.* «A review of cryogenic carbon capture research: Experimental studies, simulations, and application potential», *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 61, p. 103562, 2025, doi: 10.1016/j.tsep.2025.103562.
- [38] P. Atkins, J. D. Paula, y J. Keeler, *Atkins Physical Chemistry*, 12.ª ed. Oxford University Press, 2022. doi: 10.1093/hesc/9780198847816.001.0001.

- [39] M. Escobar y E. González del Valle, «Métodos de decisión multicriterio», n.º 10, 2005.
- [40] A. López y R. Maceiras, «Análisis multicriterio de técnicas de almacenamiento de hidrógeno», 2025.
- [41] E. Arbeláez, «El análisis multicriterio en la gestión de la biodiversidad», 2010.
- [42] A. Solano, «Sistema multicriterio de recomendación basado en operadores de lógica graduada de preferencias para la orientación segura en un destino turístico», 2025.
- [43] C. Hwang y K. Yoon, «Multiple Attribute Decision Making: Methods and Application», 1981.
- [44] M. Ayora, «Proceso analítico jerárquico y TOPSIS aplicados a la selección de una cámara digital», 2019.
- [45] E. Pérez, M. Aguer, y J. Martínez, *Administración y dirección de empresas: teoría y ejercicios resueltos*, Editorial Universitaria Ramón Areces. 2004.
- [46] V. Penadés, T. García, J. Martí, y V. Yepes, «A Review of Multi-Criteria Decision-Making Methods Applied to the Sustainable Bridge Design», *Sustainability*, vol. 8, n.º 12, p. 1295, 2016, doi: 10.3390/su8121295.
- [47] T. L. Saaty, «How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process», 1980.
- [48] J. Osorio y J. Orejuela, «El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación», 2008.
- [49] A. Ishizaka y A. Labib, «Review of the main developments in the analytic hierarchy process», *Expert Systems with Applications*, 2011, doi: 10.1016/j.eswa.2011.04.143.
- [50] P. Chatterjee y S. Chakraborty, «A comparative analysis of VIKOR method and its variants», *10.5267/j.dsl*, pp. 469-486, 2016, doi: 10.5267/j.dsl.2016.5.004.
- [51] Z. Gao, R. Liang, y T. Xuan, «VIKOR method for ranking concrete bridge repair projects with target-based criteria», *Results in Engineering*, 2019, doi: 10.1016/j.rineng.2019.100018.
- [52] D. Hernández, E. Valdovinos, y M. Petriz, «Revisión de las principales tecnologías de captura de CO₂ para los efluentes de sistemas de producción de energía», *TERYS*, vol. 4, n.º 1, pp. 98-104, 2025, doi: 10.56845/terys.v4i1.485.
- [53] C. Font, D. Cann, y C. Udemu, «Review of Cryogenic Carbon Capture Innovations and Their Potential Applications», vol. 7, n.º 3, 2021, doi: 10.3390/c7030058.
- [54] J. Ibañez, «Niveles de madurez tecnológica. Technology Readiness levels. TRLS. Una introducción», 2020.
- [55] N. Sepahi, A. Ilinca, y D. Rousse, «Multi-criteria decision analysis for evaluating carbon capture technologies in power plants», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 219, 2025, doi: 10.1016/j.rser.2025.115699.

- [56] B. Dziejarski, R. Krzyżyńska, y K. Andersson, «Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment», *Fuel*, vol. 342, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2023.127776.
- [57] A. Davarpanah, «Comparative Evaluation of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Technologies Using Multi-Criteria Decision-Making Approaches», *ACS Sustainable Chem. Eng.*, vol. 12, n.º 25, pp. 9498-9510, jun. 2024, doi: 10.1021/acssuschemeng.4c03025.
- [58] G. Li y J. Yao, «Direct Air Capture (DAC) for Achieving Net-Zero CO₂ Emissions: Advances, Applications, and Challenges», *Eng*, vol. 5, n.º 3, jul. 2024, doi: 10.3390/eng5030069.
- [59] «Researchers pinpoint how sorbent materials catch and release carbon | ASU News». Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://news.asu.edu/20200730-researchers-pinpoint-how-sorbent-materials-catch-and-release-carbon>
- [60] E. Sanz, C. Murdock, S. Didas, y C. Jones, «Direct Capture of CO₂ from Ambient Air», *Chem. Rev.*, vol. 116, n.º 19, oct. 2016, doi: 10.1021/acs.chemrev.6b00173.
- [61] M. Fasihi, O. Efimova, y C. Breyer, «Techno-economic assessment of CO₂ Direct Air Capture plants», *Journal of Cleaner Production*, vol. 224, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.086.
- [62] D. Keith, G. Holmes, D. St. Angelo, y K. Heidel, «A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere», *Joule*, vol. 2, n.º 8, 2018, doi: 10.1016/j.joule.2018.05.006.
- [63] C. Beuttler, L. Charles, y J. Wurzbacher, «The Role of Direct Air Capture in Mitigation of Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions», vol. 1, 2019, doi: 10.3389/fclim.2019.00010.
- [64] J. You *et al.* «Influence of Additives Including Amine and Hydroxyl Groups on Aqueous Ammonia Absorbent for CO₂ Capture», *J. Phys. Chem. B*, vol. 112, n.º 14, abr. 2008, doi: 10.1021/jp711113q.
- [65] C. Hou *et al.* «Porosity and hydrophilicity modulated quaternary ammonium-based sorbents for CO₂ capture», *Chemical Engineering Journal*, vol. 413, p. 127532, 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.127532.
- [66] D. Park, J. Choi, Y. Kim, S. Nam, K. Lee, y Y. Yoon, «Chemical Absorption of Carbon Dioxide Using Aqueous Piperidine Derivatives», *Chem Eng & Technol*, vol. 40, n.º 12, 2017, doi: 10.1002/ceat.201700375.
- [67] S. Voskian y T. A. Hatton, «Faradaic electro-swing reactive adsorption for CO₂ capture», *Energy Environ. Sci.*, vol. 12, n.º 12, 2019, doi: 10.1039/C9EE02412C.
- [68] T. Wang, K. S. Lackner, y A. B. Wright, «Moisture-swing sorption for carbon dioxide capture from ambient air: a thermodynamic analysis», *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 15, n.º 2, 2013, doi: 10.1039/C2CP43124F.
- [69] S. Fujikawa, R. Selyanchyn, y T. Kunitake, «A new strategy for membrane-based direct air capture», *Polymer Journal*, vol. 53, n.º 1, 2021, doi: 10.1038/s41428-020-00429-z.

- [70] «World IP Day Case Study – Climeworks: A Technology to Reverse Climate Change», ipday. Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.wipo.int/en/web/ipday/2020/case-studies/climeworks>
- [71] «Mammoth: our newest direct air capture and storage facility», Climeworks. Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://climeworks.com/plant-mammoth>
- [72] «CO₂: cómo funciona en Islandia la primera planta que captura el gas y lo transforma en roca», BBC News Mundo. Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/articles/c3gx8ze2ylmo>
- [73] «Direct Air Capture - Energy System», IEA. Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture>
- [74] C. Lust, «Carbon Engineering begins work on supporting multi-million tonne Direct Air Capture facilities in South Texas», Carbon Engineering. Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://carbonengineering.com/news-updates/multi-million-tonne-south-texas/>

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS, Y AMBIENTALES

Las tecnologías de captura de CO₂ constituyen una herramienta relevante dentro de las estrategias actuales de mitigación del cambio climático. No obstante, su análisis no debe limitarse únicamente a la comparación de sus posibles alternativas, sino que se debe incorporar una visión más amplia que influya en aspectos ambientales, económicos y sociales de mayor escala. Aunque algunos de estos aspectos ya han sido considerados dentro de los criterios del análisis, es pertinente reflexionar de forma global sobre las implicaciones que conlleva la implantación real de estas tecnologías.

Desde el punto de vista ambiental, estas tecnologías permiten reducir de forma notable las emisiones de CO₂ en sectores industriales, favoreciendo el cumplimiento de los objetivos de descarbonización. No obstante, su eficacia depende en gran medida de factores como la penalización energética. El origen de esta energía (fuentes fósiles o renovables), así como de la correcta gestión de materiales, disolventes y de su posterior almacenamiento, son elementos necesarios a tener en cuenta para garantizar la sostenibilidad global.

En el ámbito económico, la captura de CO₂ implica costes de inversión asociados a la adquisición de infraestructura y equipos, así como costes de operación derivados de la renovación de materiales y a la penalización energética del proceso. Esta circunstancia puede afectar a la competitividad industrial, quedando su viabilidad condicionada por las regulaciones a las que se sometan los estados y a instrumentos como los impuestos al carbono o sistemas de comercio de emisiones.

En el plano social, la aceptación de estas tecnologías está vinculada a la percepción de su seguridad y de su papel en la transición energética. Mientras que pueden considerarse una herramienta necesaria para reducir emisiones en sectores difíciles de descarbonizar, también pueden interpretarse como una prolongación del uso de combustibles fósiles. Por ello, la transparencia en su aplicación y su coherencia con las políticas climáticas resultan fundamentales para garantizar su legitimidad social.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

En la actualidad, la sostenibilidad y la protección del medio ambiente representan uno de los grandes retos a los que se enfrenta la sociedad. La preocupación creciente por el cambio climático ha reforzado la conciencia colectiva sobre la necesidad de actuar de forma responsable y sostenible. Se han identificado las emisiones de dióxido de carbono como uno de los principales factores que contribuyen al calentamiento global, lo que ha impulsado el desarrollo de distintas estrategias orientadas a reducir su presencia en la atmósfera.

La aplicación de tecnologías de captura de CO₂ no es únicamente una cuestión técnica, sino que también plantea reflexiones de carácter ético. En este Trabajo de Fin de Grado se ha comparado distintas alternativas desde un enfoque multicriterio, atendiendo a criterios técnicos, ambientales y económicos. Sin embargo, más allá de los resultados obtenidos, resulta necesario plantearse qué papel deben desempeñar estas tecnologías dentro de la transición energética y si su desarrollo contribuye realmente a una transformación profunda del modelo actual.

Por un lado, la captura puede considerarse una herramienta necesaria para reducir emisiones en sectores donde la electrificación o las fuentes renovables no son viables a corto plazo. Por otro, existe el riesgo de que se perciba como una solución que mantenga durante más tiempo el uso de combustibles fósiles. La clave radica en que su implantación se entienda como una medida complementaria y transitoria, integrada en una estrategia de descarbonización.

Asimismo, estas decisiones tienen implicaciones sociales relacionadas con la distribución de costes, la equidad y la responsabilidad hacia las generaciones futuras. La aceptación pública dependerá de la transparencia en su aplicación y de la confianza en su seguridad. En definitiva, la valoración ética de estas tecnologías no depende solo de su eficacia técnica, sino de la coherencia con los principios de sostenibilidad y responsabilidad que deben guiar la transición energética.

ANEXO III: TABLAS CORRESPONDIENTES AL DESARROLLO DEL MÉTODO AHP

En el presente anexo se recogen las tablas completas correspondientes al procedimiento del método AHP. El criterio de eficiencia ya fue explicado en el apartado 4.1.2, por lo tanto, a continuación, se presentarán los demás criterios.

También se expone las tablas que presentan las nuevas ponderaciones de los criterios de los distintos escenarios del análisis de sensibilidad.

A				
CRITERIO: Consumo energético				
Alternativas	Absorción	Adsorción	Membranas	Criogenización
Absorción	1	1/3	1/4	3
Adsorción	3	1	1/2	5
Membranas	4	2	1	6
Criogenización	1/3	1/5	1/6	1
TOTAL	8,3333	3,5333	1,9167	15,0000

Tabla A3-1 Matriz de comparaciones pareada según el consumo energético

B					V
Alternativas	Absorción	Adsorción	Membranas	Criogenización	
Absorción	0,1200	0,0943	0,1304	0,2000	
Adsorción	0,3600	0,2830	0,2609	0,3333	
Membranas	0,4800	0,5660	0,5217	0,4000	
Criogenización	0,0400	0,0566	0,0870	0,0667	
					0,1362
					0,3093
					0,4919
					0,0626

Tabla A3-2 Normalización y cálculo del vector de prioridad según el consumo energético

F (Vector Fila)	Q (Cociente)	$\lambda_{max} = 4,0796$
0,5500	4,0380	IC (Índice de consistencia) = 0,0265
1,2766	4,1274	
2,0307	4,1278	RC (Razón de consistencia) = 0,0295
0,2518	4,0252	

Tabla A3-3 Comprobación de consistencia de los resultados según el consumo energético

A				
CRITERIO: Madurez tecnológica				
Alternativas	Absorción	Adsorción	Membranas	Criogenización
Absorción	1	3	4	5
Adsorción	1/3	1	2	3
Membranas	1/4	1/2	1	2
Criogenización	1/5	1/3	1/2	1
TOTAL	1,7833	4,8333	7,5000	11,0000

Tabla A3-4 Matriz de comparaciones pareada según la madurez tecnológica

B					V
Alternativas	Absorción	Adsorción	Membranas	Criogenización	
Absorción	0,5607	0,6207	0,5333	0,4545	
Adsorción	0,1869	0,2069	0,2667	0,2727	
Membranas	0,1402	0,1034	0,1333	0,1818	
Criogenización	0,1121	0,0690	0,0667	0,0909	

Tabla A3-5 Normalización y cálculo del vector de prioridad según la madurez tecnológica

F (Vector Fila)	Q (Cociente)	$\lambda_{max} = 4,0512$
2,2244	4,1015	IC (Índice de consistencia) = 0,0171
0,9475	4,0612	
0,5613	4,0178	RC (Razón de consistencia) = 0,0190
0,3408	4,0244	

Tabla A3-6 Comprobación de consistencia de los resultados según la madurez tecnológica

A				
CRITERIO: Seguridad				
Alternativas	Absorción	Adsorción	Membranas	Criogenización
Absorción	1	1/2	1/2	2
Adsorción	2	1	1	3
Membranas	2	1	1	3
Criogenización	1/2	1/3	1/3	1
TOTAL	5,5000	2,8333	2,8333	9,0000

Tabla A3-7 Matriz de comparaciones pareada según la seguridad

B					V
Alternativas	Absorción	Adsorción	Membranas	Criogenización	
Absorción	0,1818	0,1765	0,1765	0,2222	
Adsorción	0,3636	0,3529	0,3529	0,3333	
Membranas	0,3636	0,3529	0,3529	0,3333	
Criogenización	0,0909	0,1176	0,1176	0,1111	

Tabla A3-8 Normalización y cálculo del vector de prioridad según la seguridad

F (Vector Fila)	Q (Cociente)	$\lambda_{max} = 4,0104$
0,7586	4,0086	IC (Índice de consistencia) = 0,0035
1,4079	4,0144	
1,4079	4,0144	RC (Razón de consistencia) = 0,0038
0,4378	4,0041	

Tabla A3-9 Comprobación de consistencia de los resultados según la seguridad

A				
CRITERIO: Coste				
Alternativas	Absorción	Adsorción	Membranas	Criogenización
Absorción	1	1/3	2	4
Adsorción	3	1	4	6
Membranas	1/2	1/4	1	3
Criogenización	1/4	1/6	1/3	1
TOTAL	4,7500	1,7500	7,3333	14,0000

Tabla A3-10 Matriz de comparaciones pareada según el coste

B					V
Alternativas	Absorción	Adsorción	Membranas	Criogenización	
Absorción	0,2105	0,1905	0,2727	0,2857	
Adsorción	0,6316	0,5714	0,5455	0,4286	
Membranas	0,1053	0,1429	0,1364	0,2143	
Criogenización	0,0526	0,0952	0,0455	0,0714	

Tabla A3-11 Normalización y cálculo del vector de prioridad según el coste

F (Vector Fila)	Q (Cociente)	$\lambda_{max} = 4,0818$
0,9854	4,1083	IC (Índice de consistencia) = 0,0273
2,2597	4,1520	
0,6043	4,0366	RC (Razón de consistencia) = 0,0303
0,2668	4,0303	

Tabla A3-12 Comprobación de consistencia de los resultados según el coste

A				
CRITERIO: Escalabilidad				
Alternativas	Absorción	Adsorción	Membranas	Criogenización
Absorción	1	3	4	5
Adsorción	1/3	1	2	3
Membranas	1/4	1/2	1	2
Criogenización	1/5	1/3	1/2	1
TOTAL	1,7833	4,8333	7,5000	11,0000

Tabla A3-13 Matriz de comparaciones pareada según la escalabilidad

B					V
Alternativas	Absorción	Adsorción	Membranas	Criogenización	
Absorción	0,5607	0,6207	0,5333	0,4545	
Adsorción	0,1869	0,2069	0,2667	0,2727	
Membranas	0,1402	0,1034	0,1333	0,1818	
Criogenización	0,1121	0,0690	0,0667	0,0909	

Tabla A3-14 Normalización y cálculo del vector de prioridad según la escalabilidad

F (Vector Fila)	Q (Cociente)	$\lambda_{max} = 4,0512$
2,2244	4,1015	
0,9475	4,0612	IC (Índice de consistencia) = 0,0171
0,5613	4,0178	
0,3408	4,0244	RC (Razón de consistencia) = 0,0190

Tabla A3-15 Comprobación de consistencia de los resultados según la escalabilidad

A				
CRITERIO: Impacto ambiental				
Alternativas	Absorción	Adsorción	Membranas	Criogenización
Absorción	1	1/3	1/5	1/4
Adsorción	3	1	1/3	1/2
Membranas	5	3	1	2
Criogenización	4	2	1/2	1
TOTAL	13,0000	6,3333	2,0333	3,7500

Tabla A3-16 Matriz de comparaciones pareada según el impacto ambiental

B					V
Alternativas	Absorción	Adsorción	Membranas	Criogenización	
Absorción	0,0769	0,0526	0,0984	0,0667	0,0736
Adsorción	0,2308	0,1579	0,1639	0,1333	0,1715
Membranas	0,3846	0,4737	0,4918	0,5333	0,4709
Criogenización	0,3077	0,3158	0,2459	0,2667	0,2840

Tabla A3-17 Normalización y cálculo del vector de prioridad según el impacto ambiental

F (Vector Fila)	Q (Cociente)	$\lambda_{max} = 4,0514$
0,2960	4,0190	
0,6914	4,0318	IC (Índice de consistencia) = 0,0171
1,9216	4,0810	
1,1570	4,0737	RC (Razón de consistencia) = 0,0190

Tabla A3-18 Comprobación de consistencia de los resultados según el impacto ambiental

ANEXO IV: USO ÉTICO Y RESPONSABLE DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

En el desarrollo del presente trabajo se ha empleado la herramienta de inteligencia artificial (IA) ChatGPT, desarrollada por la empresa OpenAI, como apoyo a lo largo del proceso de elaboración.

Su uso se ha limitado a la mejora de la redacción y claridad expositiva de algunos fragmentos, a la explicación de conceptos teóricos con fines de comprensión, a la traducción de documentos, y en algunos casos, a la sugerencia de posibles fuentes adicionales que posteriormente han sido verificadas.

En ningún caso esta herramienta se ha utilizado para generar resultados, elaborar conclusiones ni desarrollar el contenido original del TFG. Por ello el uso de esta herramienta no ha afectado negativamente al proceso de aprendizaje, manteniéndose en todo momento un uso crítico y responsable de la información proporcionada y garantizando el rigor académico del documento.