Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Química

Estudio comparativo sobre aspectos ambientales entre las tecnologías de descarbonización por absorción de aminas y vía membranas

Autor: Adriano Serrano Vasco

Tutor: María Custodia Fernández Baco

Dpto. Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Química

Estudio comparativo sobre aspectos ambientales entre las tecnologías de descarbonización por absorción de aminas y vía membranas

Autor:
Adriano Serrano Vasco

Tutora:
María Custodia Fernández Baco
Profesora Colaboradora

Dpto. Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2024

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Desde pequeño me han enseñado a agradecer lo que otras personas hacen por mí, y qué mejor lugar para agradecer a todas las personas que han formado parte de mi camino en el grado de ingeniería química que aquí, en el culmen de la misma.

Agradecer en primer lugar a mi círculo más cercano, mi familia, la que siempre estuvo ahí, en los buenos momentos y, sobre todo, en los peores. Especialmente a mi madre, por siempre darme la motivación para seguir adelante, por enseñarme la importancia del trabajo y la educación en cualquier ámbito de la vida; a mi hermano, por mostrarme siempre la parte positiva de las cosas, y por mostrar que mi trabajo ha servido como referente para él; a mi tío por la felicidad que muestra en cada aprobado y la tristeza en cada suspenso, y finalmente, a mi abuela, la persona por la que merecía la pena cada hora de estudio, por ser mi fan número 1 de forma incondicional.

A todos mis compañeros y amigos de clase, en especial a mi círculo más cercano, ellos saben quién son, por mostrar su preocupación hacia mí en los momentos de mayor estrés, por siempre tener las palabras necesarias cuando hacen falta, han sido un apoyo imprescindible en estos cuatro años y sin ellos, todo habría sido distinto.

Agradecer al departamento de Ingeniería Química y Ambiental, a todos y cada uno de los profesores que lo conforman, sin excepción, por mostrar tanto aprecio y atención al alumnado, por la forma de impartir la docencia, y por ser tan buenos profesionales y personas. Especialmente a Custodia, mi tutora del trabajo de fin de grado, me has enseñado a ser mejor ingeniero cada día y a entender lo bonito de esta profesión, siempre todo con una sonrisa, estaré eternamente agradecido por tu apoyo.

Finalmente, y no por ello menos importante, agradecer a INERCO por darme la oportunidad de trabajar con ellos y aprender sobre el terreno de las autorizaciones ambientales, parte clave de este trabajo, en especial agradecer a Yolanda Prada y a Lucía Martín por todo el proceso de selección de personal y su siempre eficaz atención, y a María José Calle, por darme la oportunidad de formar parte de un equipo tan increíble como son las personas del área de medioambiente, por confiar en mí y enseñarme tanto sobre un área tan importante e interesante.

A todos ellos, por formar parte de mi persona, muchas gracias.

Resumen

En este Trabajo de Fin de Grado se realiza un estudio de las distintas tecnologías de captura de CO_2 en postcombustión, eligiendo posteriormente mediante un análisis de alternativas las dos tecnologías que resultan ser más aptas según los criterios de estudio de dicho análisis para posteriormente desarrollar de manera más precisa el funcionamiento de ambas tecnologías seleccionadas y así poder compararlas con el fin de realizar el capítulo de Vulnerabilidad del Proyecto, perteneciente al documento de Estudio de Impacto Ambiental.

Para la realización del estudio se usan datos pertenecientes a AEMET y a los visores del Geoportal del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, para realizar los contenidos del documento de vulnerabilidad, adicionalmente se selecciona y justifica una localización apropiada para un Proyecto de captura de CO_2 en la provincia de Sevilla, así como la inclusión de la legislación base en la que se encuadra el Estudio de Impacto Ambiental.

Entre los efectos a estudiar dentro del documento de vulnerabilidad, destacan los efectos derivados del cambio climático y un estudio del riesgo de la Planta con respecto a catástrofes naturales. El estudio de vulnerabilidad se realiza de forma paralela a las dos tecnologías seleccionadas, aportando no solo el nivel de vulnerabilidad general para los Proyectos, sino que, mencionando en cada caso, qué Proyecto es más vulnerable frente a los efectos estudiados.

Finalmente, se incluyen unas conclusiones que dejan ver el resultado del estudio realizado, así como las diferencias que existen entre realizar un Proyecto con un tipo de tecnología u otro, con el fin de determinar qué tipo de instalación enfrenta menos perjuicios desde el punto de vista de las catástrofes naturales y de los efectos derivados del cambio climático.

Abstract

In this Final Degree Project, a study of different post-combustion CO_2 capture technologies is done, later doing an alternatives analysis the two technologies that are the most suitable according to the studied criteria of said analysis are chosen. These technologies are then developed in more detail to compare their operation, aiming to create the Vulnerability chapter of the Project, which is part of the Environmental Impact Study document.

For the study, data from AEMET and the Geoportal viewers of the Ministry for Ecological Transition and the Demographic Challenge are used to create the contents of the vulnerability document. Additionally, a proper location for a CO2 capture project in the province of Seville is selected and justified, along with the inclusion of the basic legislation in which the Environmental Impact Study is englobed.

Among the effects to be studied within the vulnerability document are the impacts of climate change and a risk evaluation of the Plant concerning natural disasters. The vulnerability study is conducted in parallel with the two selected technologies, providing not only the general vulnerability level for the Projects but also specifying which Project is more vulnerable to the studied effects in each case.

Finally, conclusions are included that show the results of the study, as well as the differences between carrying out a Project with one type of technology or another, to determine which type of installation faces fewer disadvantages from the perspective of natural disasters and the effects of climate change.

Índice

Agradecimientos viii

Resumen x

Abstract xii

Índice xiii

Índice de Tablas xv

Índice de Figuras xvii

1. Introducción: Descarbonización de la industria; Captura de CO_2 1

1.1. Alcance del proyecto 1

1.2. Descarbonización de la industria 1

1.3. Fundamentos de captura de CO2 4

1.3.1. Captura en precombustión 4

1.3.2. Captura en postcombustión 5

1.3.3. Captura en oxicombustión 6

2. Tecnologías de captura postcombustión: comparativa y aplicaciones 8

2.1. Tecnología de captura en postcombustión 8

2.2. Análisis de alternativas de captura 10

2.3. Captura por tecnología de membranas 13

2.4. Captura por tecnología de absorción con aminas 15

2.5. Comparativa de tecnologías de captura 16

3. Características generales de las instalaciones 18

3.1. Características constructivas de las instalaciones 18

3.2. Características operacionales de las instalaciones 19

4. Legislación base del proyecto 22

4.1. Ubicación del proyecto 22

4.2. Estudio de impacto ambiental 22

5. Vulnerabilidad del proyecto 25

5.1. Análisis ambiental de la vulnerabilidad del proyecto 26

5.1.1. Metodología del análisis de vulnerabilidad ambiental 27

5.1.1.1. Identificación de los riesgos 28

5.1.1.2. Determinación del grado de adaptación 31

5.1.1.3. Caracterización de la vulnerabilidad ambiental 32
5.2. Vulnerabilidad ambiental del proyecto ante catástrofes naturales 33
5.2.1. Condiciones meteorológicas adversas 34
5.2.2. Valoración cuantitativa de los riesgos ante catástrofes naturales 42
5.2.3. Evaluación de la vulnerabilidad del proyecto ante catástrofes naturales 44
5.3. Vulnerabilidad del proyecto ante efectos derivados del cambio climático 46
5.3.1. Identificación y valorización de los riesgos derivados por el cambio climático 46
5.3.2. Valoración cuantitativa del riesgo 51
5.3.3. Evaluación de la vulnerabilidad del proyecto ante los efectos derivados del cambio climático 53
5.4. Vulnerabilidad global del proyecto 55
6. Conclusiones 57
7. Referencias 59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Ventajas y desventajas de las tecnologías de captura de CO2 11

Tabla 2.2. Análisis de alternativas a las tecnologías de captura de CO2 12

Tabla 5.1. Grado de probabilidad de los impactos 28

Tabla 5.2. Grado de consecuencia de los impactos 29

Tabla 5.3. Matriz de índices de riesgo 30

Tabla 5.4. Tipología de riesgo 30

Tabla 5.5. Capacidad de adaptación 31

Tabla 5.6. Vulnerabilidad del sistema a una determinada amenaza 32

Tabla 5.7. Tipología de la vulnerabilidad 33

Tabla 5.8. Niveles de aviso meteorológico: Campiña sevillana 34

Tabla 5.9. Grados de la escala EMS-98 40

Tabla 5.10. Riesgo para catástrofes naturales 42

Tabla 5.11. Matriz de riesgo para catástrofes naturales 44

Tabla 5.12. Resultados de la vulnerabilidad ante catástrofes naturales 45

Tabla 5.13. Matriz de resultados de la vulnerabilidad ante catástrofes naturales 46

Tabla 5.14. Riesgo debido al cambio climático 51

Tabla 5.15. Matriz de riesgo para efectos derivados del cambio climático 52

Tabla 5.16. Resultados de la vulnerabilidad ante efectos derivados del cambio climático 53

Tabla 5.17. Matriz de resultados de la vulnerabilidad ante los efectos derivados del cambio climático 54

Tabla 5.18. Resumen de la vulnerabilidad del proyecto 55

Tabla 5.19. Matriz global de la vulnerabilidad del proyecto 56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Cambio de temperatura respecto al nivel entre 1850 y 1900 2
Figura 1.2. Emisiones de CO2 por quema de combustibles fósiles 3
Figura 1.3. Proceso de Captura de CO2 para centrales de gas natural 5
Figura 1.4. Sistema de captura en postcombustión con acondicionamiento 6
Figura 1.5. Sistema de Oxicombustión con reciclo de gases de combustión 7
Figura 2.1. Sistema Carbonatación-Calcinación 8
Figura 2.2. Solventes para absorción física 9
Figura 2.3. Funcionamiento de membrana en captura 13
Figura 2.4. Sistema de captura con membranas 13
Figura 2.5. Tipos de membranas 14
Figura 2.6. Disposición del Sistema de Captura mediante aminas 15
Figura 5.1. Metodología de vulnerabilidad 28
Figura 5.2. Temperatura máxima diaria. Estación meteorológica Sevilla San Pablo 35
Figura 5.3. Temperatura mínima diaria. Estación meteorológica Sevilla San Pablo 35
Figura 5.4. Velocidad máxima diaria del viento. Estación meteorológica Sevilla San Pablo 36
Figura 5.5. Precipitación acumulada diaria. Estación meteorológica Sevilla San Pablo 36
Figura 5.6. Zonas Inundables 38
Figura 5.7. Frecuencia de incendio forestal 39
Figura 5.8. Mapa de peligrosidad sísmica 41
Figura 5.9. Peligrosidad sísmica de España 41
Figura 5.10. Proyecciones climatológicas relacionadas con la temperatura en Sevilla 48
Figura 5.11. Proyecciones meteorológicas relacionadas con las precipitaciones en Sevilla 50

1 INTRODUCCIÓN: DESCARBONIZACIÓN DE LA INDUSTRIA; CAPTURA DE CO_2

1.1 Alcance del proyecto

El objetivo del presente documento se basa en la realización de un análisis de vulnerabilidad frente a catástrofes naturales y a efectos derivados del cambio climático de proyectos de captura de CO_2, estableciendo una comparativa entre las tecnologías seleccionadas de dicha actividad, así como determinar la legislación en materia de evaluación de impacto ambiental que aplica a la Planta proyectada.

El estudio de vulnerabilidad consiste en el análisis y estimación de los riesgos de una Planta en una localización concreta, para el estudio se analizan tres bloques: Accidentes graves, efectos derivados del cambio climático y catástrofes naturales. El objetivo del estudio consiste en determinar pseudocuantitativamente si un Proyecto es vulnerable frente a los efectos previamente descritos, para así determinar si será o no necesario establecer medidas preventivas o adaptativas a la Planta.

Para la realización de dicho estudio es necesario conocer el emplazamiento del Proyecto, así como las operaciones que se realizan en la planta que se analiza, por lo que para conocer ambos factores se realizará un estudio simplificado de las tecnologías de captura de CO_2, el fundamento de la captura y su aplicación en la industria. Una vez realizado este análisis se llevará a cabo un estudio de alternativas que definirá aquellas tecnologías de captura de CO_2 más adecuada a implementar. Tras ello, se seleccionará y justificará la localización del Proyecto, para ello hay que tener en cuenta, la naturaleza del mismo.

Cabe mencionar que se explicará brevemente la legislación que afectará al proyecto, así como una introducción al Estudio de Impacto Ambiental, su contenido y el marco legal en que se encuadra, dado que el Proyecto propuesto requiere de evaluación de impacto ambiental, la argumentación de esto será desarrollada en posteriores capítulos del documento.

1.2 Descarbonización de la industria

Debido al aumento de la cantidad de gases de efecto invernadero, de aquí en adelante, GEI, en la atmósfera, hay un aumento considerable de la temperatura del planeta, dicho aumento viene dado por un gran incremento del carbono antropogénico emitido a la atmósfera. Dicho incremento de temperatura se observa en la Figura 1.1, en la cual se muestra el aumento estimado de la temperatura global por encima de los niveles de 1850 a 1900.

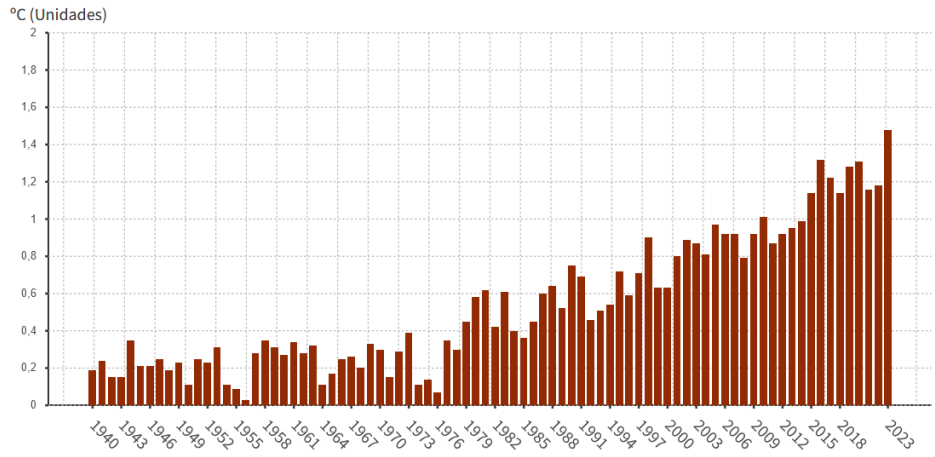

Figura 1.1: Cambio de temperatura respecto al nivel entre 1850 y 1900 [1]

Este aumento de temperaturas viene dado principalmente por la mayor actividad industrial desarrollada desde el periodo de la Revolución Industrial de 1760, momento en el que el desarrollo económico se focaliza en la actividad industrial. Las emisiones de gases de efecto invernadero están directamente relacionadas con esta actividad, debido al uso de combustibles fósiles.

A consecuencia de dichos gases, parte del calor que debería escapar al espacio es retenido en la atmósfera, generando un calentamiento progresivo en la Tierra, el cual se va acrecentando a medida que se emiten una mayor cantidad de estos gases, la mayoría de los cuales son emitidos por la acción humana, por el llamado dióxido de carbono antropogénico.

El dióxido de carbono antropogénico es aquel que es emitido a la atmósfera debido a la acción humana, este ha sido incrementado debido a la mayor producción industrial en todos los aspectos de la sociedad, el sector de la fabricación, el sector transporte, la agricultura y ganadería, así como la producción de electricidad, los cuales contribuyen a la mayor presencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Estos sectores, si bien no han crecido de forma paralela, tienen sus bases en el periodo de la historia en el que se empezó a desarrollar la actividad industrial, la Revolución industrial del siglo XVIII.

Ésta comenzó 1760 en Inglaterra, cuya economía evolucionó de una que se dedicaba al sector agrario y artesanal, a una que estaba dominada por la industria y la maquinaria. El uso de la maquinaria conlleva de forma inherente el uso de combustibles como método de accionamiento de la maquinaria, siendo éste el inicio del uso de combustibles fósiles, y por tanto, de emisiones de CO_2 debido a la actividad industrial.

La evolución de las emisiones por quema de combustibles fósiles desde el año 1750 hasta 2019 se muestran en la Figura 1.2.

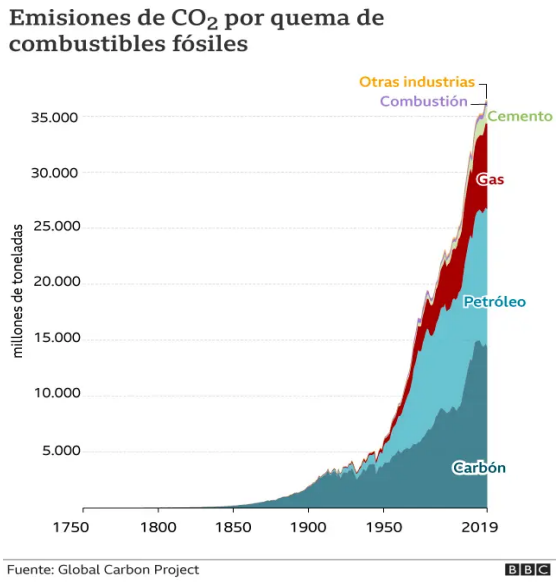

Figura 1.2: Emisiones de CO_2 por quema de combustibles fósiles

En vista de la problemática actual, se han propuesto planes de descarbonización de la industria, los cuales buscan la sustitución de combustibles fósiles y la optimización de procesos industriales en aras de una mejora ambiental sostenida que logre frenar el calentamiento global. El principal plan de descarbonización que España lleva a cabo actualmente es la Estrategia de Descarbonización a largo plazo (ELP 2050), la cual prevé reducir la cantidad de GEI en un 90% para 2050, con respecto a las emisiones en 1990. Dicho plan se engloba dentro del Marco de la Energía y Clima y del proyecto de Ley de Cambio Climático, así como del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (2021-2030) [2].

El principal vector energético a desarrollar para lograr la descarbonización de la industria son las energías renovables, entre las cuales destacan como principales el hidrógeno verde y el uso de biocombustibles que reemplacen a la energía obtenida mediante combustibles fósiles. Se estima que España importará un 13% de la energía consumida para 2050, contrastando con el 73% que se importó en el año 2018. Esta disminución de importación de energía implica a su vez un ahorro económico valorado en 344.000 millones de euros, por lo que el uso de las energías renovables supone a la vez una gran disminución de GEI, así como de un ahorro económico sustancial [2].

A nivel europeo, destaca el Objetivo 55, desarrollado e impulsado por la Unión Europea, el cual tiene como meta reducir las emisiones de GEI en al menos un 55% para el año 2030, para lo cual se promueve el uso de combustibles renovables o con bajo contenido en carbono, mejorar la eficiencia energética de la Unión Europea, así como reformar el sistema de comercio de emisiones. Además, se incentiva el uso de combustibles renovables mediante un aumento de los impuestos para los combustibles con un mayor potencial de contaminación [3].

Debido a la búsqueda de la descarbonización de la industria, tanto el uso de combustibles renovables como las tecnologías de captura de CO_2 juegan un papel crucial en los objetivos a conseguir en el medio y largo plazo, siendo actualmente, debido a las labores de investigación y desarrollo de combustibles renovables, la captura de CO_2 un primer paso vital para la consecución de hitos marcados por la Unión Europea.

1.3 Fundamentos de captura de CO_2

La captura de CO_2 se basa en la separación, transporte y almacenaje a largo plazo del CO_2 producido en procesos de combustión. El dióxido de carbono capturado tiene una gran variedad de usos, desde su uso en la industria farmacéutica hasta la industria alimentaria, creando atmósferas inertes para la conservación de alimentos. Respecto a la industria química, el CO_2 se usa para la generación de diferentes productos químicos tales como el gas de síntesis mediante reacción con hidrógeno, el metano, metanol o dimetil-éter, aportando un valor añadido a la captura, además del beneficio ambiental que supone una disminución de contaminantes atmosféricos, contribuyendo además a los objetivos de economía circular.

Existen tres alternativas de captura de CO_2, dependientes de la combustión (completa o parcial) y del instante en el que se realizan las técnicas de captura (precombustión y postcombustión). Según los objetivos de la captura y criterios técnico-económicos, se selecciona la alternativa que aporte una mayor relación coste-beneficio.

Las alternativas de captura se dividen en:

- Precombustión: Se produce tras la oxidación parcial del combustible sólido, con la finalidad de filtrar el CO_2 generado en el gas de síntesis fruto de la oxidación parcial [4]

- Postcombustión: Se produce tras una combustión convencional, se debe acondicionar los gases de combustión para realizar la separación de los componentes GEI de la corriente, para ello se emplean técnicas como la absorción química o las membranas, cabe recalcar que según la tecnología empleada se usarán una mayor cantidad de operaciones para acondicionar la corriente, ya que, debido a los principios físicos de funcionamiento, cada uno necesita unas condiciones diferentes. Entre las operaciones que se deben dar para acondicionar la corriente se encuentran la eliminación de partículas, desulfuración de gases y enfriamiento de la corriente

- Oxicombustión: Combustión en ausencia de nitrógeno, solo oxígeno, logrando una disminución del gas comburente, ya que el nitrógeno perteneciente al aire no se calienta. Su importancia en la captura de CO_2 radica en que este tipo de combustión generan unos gases ricos en dióxido de carbono.

1.3.1 Captura en precombustión

La captura en precombustión se basa en la eliminación de las moléculas de carbono existente en el gas de síntesis proveniente de los combustibles como el carbón o el gas natural, previo a su combustión, para ello se oxida parcialmente el combustible con un gasificador o mediante el reformado en caso de tratarse de gas natural. Tras ello, se obtiene el gas de síntesis, formado por CO y H_2 mayoritariamente, la composición aproximada de dióxido de carbono y metano en el gas de síntesis es aproximadamente del 10% y 3% respectivamente, encontrándose además trazas de agua e hidrocarburos [5].

Tras la oxidación parcial, el gas de síntesis se filtra y se acondiciona para las etapas posteriores con el fin de someter el monóxido existente en el gas a una reacción de desplazamiento de agua, normalmente abreviada como WGSR por sus siglas en inglés (Water Gas Shift Reaction) la cual, químicamente viene definida por:

$$CO + H_2O \rightleftarrows CO_2 + H_2 \qquad \text{[Ec.1]}$$

La reacción genera un flujo de dióxido de carbono y más hidrógeno, el CO_2 se procede a su almacenaje o utilización posterior mientras que el flujo de hidrógeno puede usarse en diversas aplicaciones, dado que el hidrógeno actualmente tiene gran valor añadido debido al auge de la energía renovable, este puede usarse para la obtención de nuevos compuestos químicos, como combustible en instalaciones de combustión o para la producción de electricidad.

En la Figura 1.3 se muestra un ejemplo de planta de gas natural con captura de CO_2 y obtención de electricidad mediante ciclo combinado.

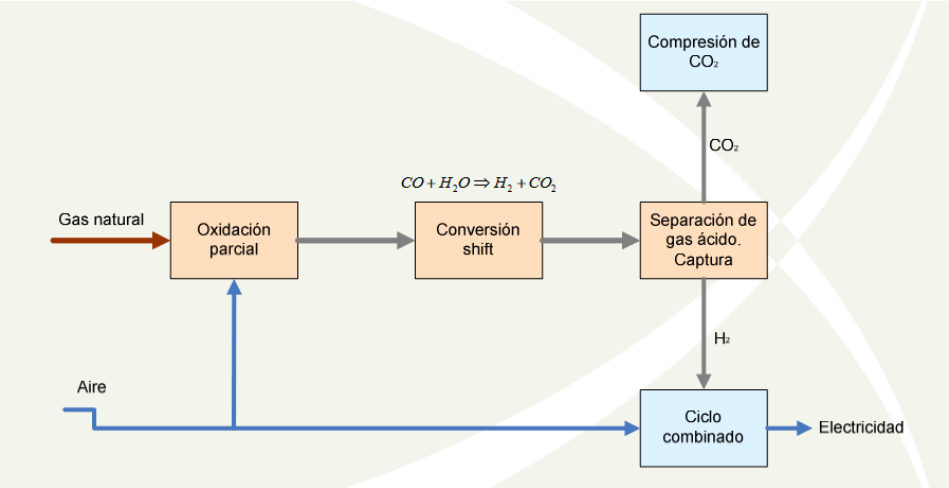

Figura 1.3: Proceso de Captura de CO_2 para centrales de gas natural [5]

1.3.2 Captura en postcombustión

La captura de CO_2 en postcombustión se basa en la obtención del dióxido de carbono tras el proceso de combustión, mediante la separación del CO_2 de la corriente de gases de combustión. Debido a la cantidad de compuestos diferentes existentes en dicha corriente, es necesario acondicionarla para lograr una correcta separación del dióxido de carbono, para ello se recurren a técnicas de separación como la absorción química, por la cual se usan absorbentes químicos que logran eliminar impurezas de la corriente a tratar. Tras ello, el CO_2 se envía a un depósito de almacenamiento, mientras que el resto de gases de combustión se envían a la atmósfera.

De forma general, la composición del CO_2 en las corrientes de salida del proceso de combustión ronda el 3-15% en volumen, debido a la cantidad de impurezas frente al producto, puede ser

necesario sistemas de acondicionamiento de las corrientes, tales como sistemas de eliminación de partículas o de eliminación de compuestos azufrados, dado que estos afectan negativamente al proceso de separación. En la Figura 1.4 se muestra un diagrama simplificado del sistema de captura mencionado.

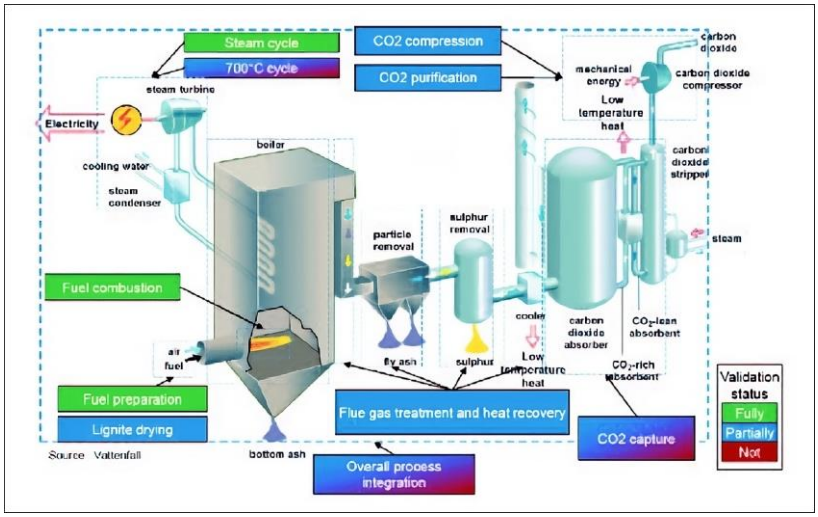

Figura 1.4: Sistema de captura en postcombustión con acondicionamiento [6]

1.3.3 Captura en oxicombustión

La captura en oxicombustión tiene como fundamento la combustión mediante el uso de oxígeno, en ausencia de nitrógeno, esto genera unos gases de combustión principalmente formados por CO_2 y H_2O. Para el desarrollo de esta forma de captura es necesario un sistema de separación del oxígeno y nitrógeno del aire, esta operación implica un coste energético muy alto, por lo que se utiliza una combustión en bucle químico, el cual consiste en el uso de un metal portador de oxígeno, el cual sirve como método para evitar la etapa de separación del oxígeno.

El principio de funcionamiento del metal portador consiste en la reacción de un elemento metálico, generalmente hierro, cobre, cobalto o zinc para la generación de un óxido metálico al unirse con el oxígeno del aire, tras ello, se somete a una reacción redox junto con el combustible, siendo el óxido el portador de oxígeno a la reacción, evitando la necesidad de una separación de los componentes del aire. Finalmente, el óxido resultante en la reacción se somete a una nueva reacción redox con el fin de devolverlo a su forma original.

De forma general, las reacciones para este sistema, mediante el uso de un hidrocarburo como combustible, se obtiene que las reacciones del proceso son las siguientes [5]

$$(2n+m)Me_xO_x + C_nH_{2m} \longrightarrow (2n+m)Me_xO_y^{-1} + mH_2O + CO_2 \qquad \text{[Ec.2]}$$

Siendo Me el metal portador mencionado previamente. Tras la primera reacción redox, se realiza una segunda reacción en un reactor independiente, en la que se regenera el óxido de la primera reacción, cerrando así el ciclo.

$$Me_xO_y^{-1} + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow Me_xO_y \qquad \text{[Ec.3]}$$

La Figura 1.5 muestra un sistema de oxicombustión con recirculación de gas para reducir la temperatura de combustión.

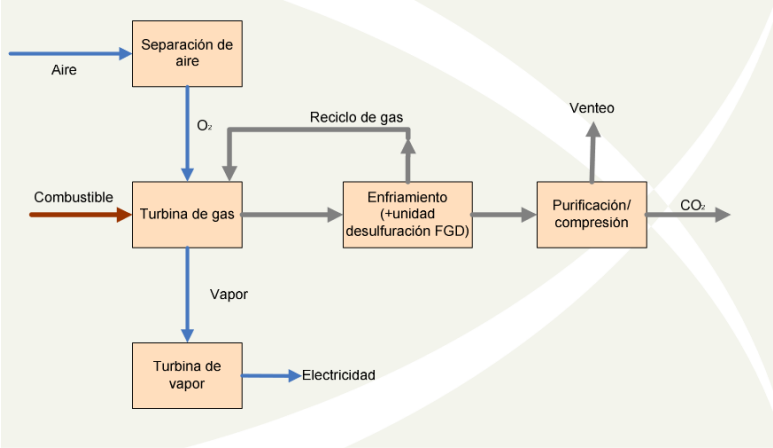

Figura 1.5: Sistema de Oxicombustión con reciclo de gases de combustión [5]

2 TECNOLOGÍAS DE CAPTURA POSTCOMBUSTIÓN: COMPARATIVA Y APLICACIONES

Las técnicas de captura en postcombustión han sido las más utilizadas en la industria, dado que ofrecen una solución eficaz y versátil al problema de las emisiones de CO_2, por ello se han desarrollado una variedad de tecnologías de captura en postcombustión que ofrecen alternativas para lograr el objetivo deseado. El campo de estudio del presente documento se centra en el uso de tecnologías de captura mediante membranas y absorción química con aminas, aunque para ello se aportan las bases de las diversas tecnologías de captura en postcombustión.

2.1 Tecnologías de captura en postcombustión

En el presente apartado se realizará una definición de las principales tecnologías de captura de CO_2 en postcombustión, con el fin de seleccionar las dos tecnologías que, por su rendimiento, principio de funcionamiento y madurez tecnológica supongan una mejor alternativa para la planta proyectada, en los posteriores apartados se realizará una explicación más exhaustiva de las dos tecnologías seleccionadas

- **Absorción química:** Se basa en un sistema de absorción con aminas, se dispone en contracorriente el flujo de gases de combustión y el flujo de absorbente por la parte superior de la torre de absorción. El principio físico que rige dicho sistema se basa en la transferencia de materia de la fase gaseosa a la fase líquida, logrando la separación de los componentes de la mezcla en los gases de combustión.

- **Carbonatación-Calcinación:** Es un proceso muy prometedor para centrales térmicas, el principio de separación se basa en la carbonatación del CO_2 mediante contacto con CaO para formar $CaCO_3$, el cual se calcina posteriormente mediante la adición de calor. Cabe mencionar que debido a la existencia de SO_2 en los gases de combustión, estos también reaccionan formando $CaSO_4$, por ello el proceso de calcinación es vital controlar correctamente la temperatura, para que este no se degrade y contamine la corriente de CO_2. En la Figura 2.1 se muestra el sistema descrito.

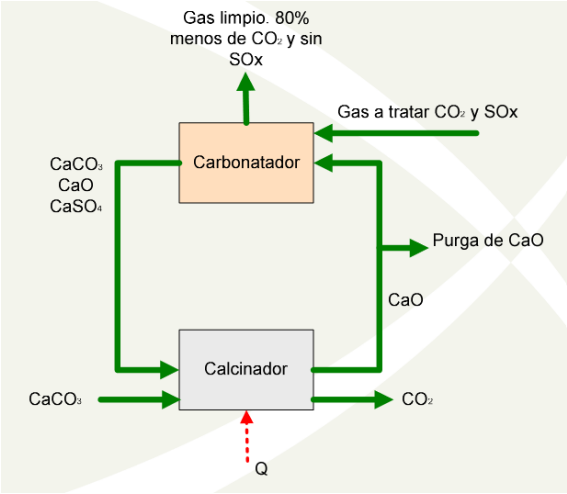

Figura 2.1 Sistema Carbonatación-Calcinación [5]

- **Absorción Física:** El proceso de absorción física depende de la presión parcial y solubilidad del gas, su uso es eminentemente para procesos a altas presiones, su principio físico es similar a la absorción química, dado que se usa un absorbente, solo que este no genera una reacción química con los gases de combustión, ello genera que la velocidad de absorción sea menor a la absorción química. En la absorción física, la fuerza impulsora son las fuerzas de Van der Waals. La operación se ve favorecida a presiones altas. En la Figura 2.2 se muestran los tipos de solventes y condiciones de operación para cada uno de ellos [7].

Solventes comerciales	Tipo de solvente	Condiciones de operación
Rectisol	Metanol	-10 °C a -70 °C, >2 MPa
Purisol	n-metil 2 pirrolidina	-20 °C a -40 °C, >2 MPa
Selexol	Éter dimetílico de polietilenglicol	-40 °C, >2 MPa-3 MPa
Flúor	Carbonato de propileno	> 25 °C, 3,1 MPa a 6,9 MPa
Sepasolv	Éteres metilisopropílicos de etilenglicol	--
Etasolvan	n-tributil-fosfato	--

Figura 2.2: Solventes para absorción física [7]

- **Adsorción:** El proceso de adsorción se basa en la deposición de compuestos en la superficie de un sólido poroso, para ello se selecciona un adsorbente cuya afinidad con el compuesto a adsorber sea alta, logrando así una separación eficiente del CO_2. Algunos de los adsorbentes más utilizados son las zeolitas o el carbón activo, dado que estos son bastante selectivos con el CO_2, aunque esta capacidad de adsorción y selectividad se ve reducida a medida que aumenta la temperatura del proceso [7].

- **Membranas:** El principio de funcionamiento de las membranas consiste en la diferencia de difusión de los gases en los poros de la membrana. Esta, a su vez, depende de factores constructivos y operacionales de la membrana, tales como su espesor, la presión diferencial entre las caras de la membrana, del tamaño de las partículas o su solubilidad. Para la operación se usan membranas que se pueden clasificar en dos tipos: Membranas orgánicas y membranas inorgánicas, generalmente las membranas inorgánicas se usan en procesos de precombustión y oxicombustión, mientras que las membranas orgánicas se usan para procesos en postcombustión, aunque la eficacia de las mismas se vea limitada por la temperatura del proceso.

Entre las tecnologías aplicadas en la industria, se destacan la captura por absorción con aminas, y la captura por membranas. La principal ventaja de la absorción radica en su desarrollo tecnológico, ya que esta ha sido ampliamente implementada en la industria debido a su principio de funcionamiento y buen rendimiento de captura, mientras que las membranas son una tecnología emergente, cuyo principio de funcionamiento es simple y promete ser una alternativa a la captura de CO_2. Ambos tipos de tecnologías serán desarrollados en los siguientes apartados, aportando finalmente una breve comparativa entre ellos y una posterior elección de la tecnología empleada en la planta proyectada para realizar el análisis de vulnerabilidad.

2.2 Análisis de alternativas de captura

El análisis de alternativas es una herramienta que se utiliza principalmente para la selección de una o varias alternativas entre todas las presentes, a efectos de este trabajo, el análisis de alternativas se basará en la selección de ciertas variables de decisión, las cuales se cuantificarán con el fin de lograr un resultado numérico que clarifique las mejores alternativas para implantar en la Planta proyectada.

Para el estudio se tendrá en consideración las siguientes variables y puntuaciones, teniendo en cuenta que los valores no son absolutos, sino relativos entre las tecnologías de captura.

- **Madurez tecnológica**: Medidor de la aplicabilidad de la tecnología en la industria, en caso de esta ser baja, se calificará con un 1, mientras que, si es media, con un 2, y para una alta madurez tecnológica, se calificará con 3

- **Requerimientos energéticos**: Medidor de la necesidad de aporte de energía para la operación, lo cual supone un coste añadido a la Planta, en caso de ser alta, se calificará con 1, media con 2 y baja con un 3.

- **Generación de efluentes**: Variable que muestra la generación de residuos inherentes a la propia operación, siendo 1 si se generan efluentes abundantes, 2 si los efluentes son medios y 3 si los efluentes generados son bajos.

- **Caudales de operación**: Variable que mide la cantidad de caudal que puede tratar la tecnología estudiada en cada caso, para este, se valorará como 1 si la tecnología es capaz de tratar un bajo caudal, 2 si el caudal es medio, y 3 si este caudal es alto en comparación al resto de tecnologías.

- **Complejidad de la instalación**: Variable que determina la dificultad de implantación de la tecnología, para su cuantificación se tendrá en cuenta el número de equipos que necesite y las recirculaciones que puedan existir, siendo el valor de 1 para procesos complejos, 2 para procesos con una complejidad menor, y 3 para procesos cuya complejidad sea baja.

En base a la numeración descrita, se realizará una tabla en la que se especifique la puntuación dada a cada variable, para lo cual se realizará una tabla que especifique las principales ventajas e inconvenientes de las diferentes tecnologías de captura descritas anteriormente.

Las ventajas e inconvenientes se muestran en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1:

Ventajas y desventajas de las tecnologías de captura de CO_2

Sistemas de captura	Ventajas	Inconvenientes
Absorción Química	• Tecnología altamente desarrollada • Altos rendimientos de captura (90%) • Alta pureza del CO_2 capturado (99%)	• Efluentes líquidos • Altos costes energéticos • Necesidad de torre de desorción • Materiales resistentes debido a corrosión
Absorción Física	• Eliminación de trazas de compuestos no deseados • Instalación de acero al carbono por no haber corrosión • Menor consumo para desorber • Tecnología desarrollada a nivel medio-alto	• Efluentes líquidos • Necesidad de torre de desorción • Menor capacidad de absorción a bajas presiones parciales que la absorción química • Complejidad por recirculaciones, absorción y desorción en etapas • Necesidad de altas presiones: Costes de operación [8]
Carbonatación-Calcinación	• Proceso sencillo • Aporte de energía puede provenir de una combustión que genere CO_2; Integración energética • Reacción del SO_2 con CaO podría eliminar la necesidad de desulfuración por vía húmeda [5]	• Efluentes sólidos • Riesgo de contaminación del CO_2 si no se controla la calcinación • Procesos a altas temperaturas, altos costes de operación
Adsorción	• No necesita sistema de compresión por operar a bajas presiones parciales • Útil para purificación de la corriente principal eliminando compuestos minoritarios • Bajas emisiones	• Bajos caudales • Adsorción inevitable de H_2S, necesidad de etapa previa de desulfuración • Necesidad de varias columnas debido a ser proceso multietapa: Adsorción, despresurización, desorción y presurizado
Membranas	• Tecnología versátil • Membranas inorgánicas con selectividad muy alta y buena estabilidad química • Gran resistencia a procesos a temperatura alta [9]	• Necesidad de altas presiones para generar fuerza impulsora; Costes de operación • Etapas de reciclaje debido a baja selectividad y flujo de las membranas orgánicas

Tras la exposición de las ventajas e inconvenientes de cada tecnología de captura, se procede a realizar la tabla comparativa de ellas. Cabe recalcar que, según el criterio utilizado en la numeración, el caso más favorable será aquella tecnología con la mayor cantidad de puntos, siendo la puntuación final el sumatorio de la puntuación individual de cada criterio estudiado. Las dos alternativas con una mayor cantidad de puntos serán las que se utilicen para su posterior comparativa

El análisis de alternativas se realiza en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2:

Análisis de alternativas a las tecnologías de captura de CO_2

	Absorción Química	**Absorción Física**	**Carbonatación Calcinación**	**Adsorción**	**Membranas**
Madurez Tecnológica	3	2	2	2	1
Requerimientos Energéticos	2	2	1	1	2
Generación de Efluentes	2	2	2	2	3
Caudales de Operación	3	3	1	1	2
Complejidad de la instalación	2	1	2	3	3
Sumatorio	***12***	10	8	7	***11***

En base a los resultados obtenidos, se concluye que las dos alternativas principales a estudiar en detenimiento son la absorción química y la tecnología de membranas, en los siguientes apartados del presente documento se realizará un estudio más exhaustivo de las dos alternativas, con el fin de finalmente seleccionar la más apta para implantar en el Proyecto.

2.3 Captura por tecnología de membranas

La tecnología de captura mediante membranas plantea una nueva y prometedora alternativa a los métodos convencionales de captura de CO_2, tales como la absorción química mediante aminas, aunque actualmente uno de sus mayores problemas radica en el tratamiento de grandes caudales de gas con la misma eficiencia que los métodos convencionales.

El uso de las membranas se usa comercialmente para la separación de CO_2 de una corriente de gas natural, cuya concentración varía entre el 3% y el 20% en volumen [10]. La membrana actúa como medio filtrante, eliminando los componentes no deseados de la mezcla de gases, y generando un permeado rico en el componente buscado. Se puede observar en la Figura 2.3 un esquema simplificado sobre el funcionamiento previamente descrito.

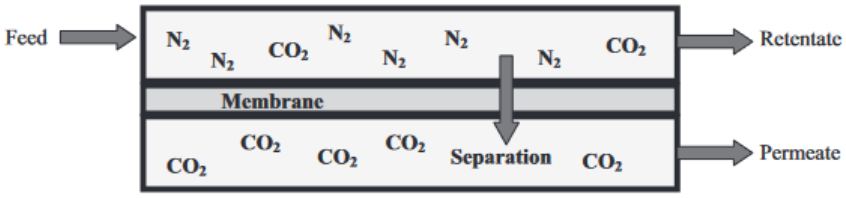

Figura 2.3: Funcionamiento de membrana en captura [10]

El funcionamiento de una membrana consiste en establecer una barrera física a dos fluidos, actuando la membrana como medio de separación selectivo, permitiendo el paso de unos compuestos a través de los poros de la membrana, impidiendo al resto de compuestos de la corriente penetrar por la membrana. Para ello, se dispone de un sistema de compresión previo a la membrana, el cual aportará energía en forma de presión, que funcionará como fuerza impulsora en el proceso de separación. En la Figura 2.4 se muestra un diagrama simplificado del sistema para un flue gas.

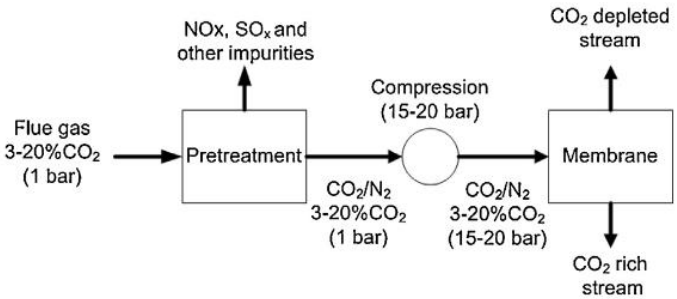

Figura 2.4: Sistema de captura con membranas [10]

El funcionamiento de la membrana depende de varios factores, entre los que destacan la composición química de la corriente, la estructura de la membrana y el espesor de la misma. El aumento del espesor de la membrana afecta directamente a la velocidad de separación de las partículas, dado que estas tienen que recorrer una mayor distancia dentro de la membrana. La resistencia mecánica de la membrana también se ve afectada, aumentando dicha resistencia y, por tanto, permitiendo una mayor diferencia de presión y por tanto, fuerza impulsora en el proceso.

Por otro lado, disminuir el espesor afectaría de forma inversa a lo previamente mencionado, favoreciendo el paso de las partículas a través de la misma, aunque soportando una menor caída de presión, siendo el flujo afectado a su vez. Para la correcta selección del espesor de la membrana se llega a un consenso entre la resistencia mecánica de la membrana y la viabilidad técnica de fabricación para un espesor dado [11]

Para cuantificar el flujo de una membrana, se utiliza la siguiente expresión:

$$J_A = \frac{P_A}{e} * Am * \Delta p \qquad \text{[Ec.4]}$$

Donde:

-J_A es el flujo que atraviesa la membrana (m^3/s)

-P_A es la permeabilidad de la membrana (m^2/bar s)

- e es el espesor de la membrana (m)

- Am es el área de la membrana (m^2)

-Δp es la fuerza impulsora, medida presión (bar)

La permeabilidad de la membrana depende de distintos factores, entre ellos destacan la densidad y viscosidad del fluido y la porosidad y superficie específica de la membrana. El tipo de membrana utilizada depende de las condiciones de operación, de los compuestos a separar y de la selectividad de la misma, también se verifica la estabilidad mecánica y química ante diferentes agentes externos, para evitar la correcta operación de separación.

Los diferentes tipos de membrana se muestran en la Figura 2.5:

Tipo de membrana	Estructura	Aplicación	Ventajas/costo
Sílice	Sílices de óxido de metal	CO_2/H_2 y CO_2/N_2	Alta selectividad/mediano a alto costo
Zeolitas	Capa fina de zeolita depositada sobre un soporte poroso.	CO_2/CH_4	Muy alta selectividad y alta permeabilidad junto con buena estabilidad térmica, mecánica y química/alto costo
Tamiz molecular de carbón	Redes aleatorias porosas, comunmente producidas por pirólisis de polímeros termoestables bajo condiciones controladas	CO_2/CH_4	Buena estabilidad térmica y química/Alto a muy alto costo. El costo es de 1 a 3 órdenes de magnitud mayor por unidad de área que las membranas poliméricas debido al método de obtención.
Metal	Paladio y aleaciones o compuestos de Pd en soporte de tantalio o película de vanadio.	Separación de H_2	Selectividad alta, alta tolerancia a la temperatura/coste muy alto
Cerámica	Al_2O_3, SiO_2 Perovskitas y fluoritas	O_2/N_2	Selectividad alta, alta tolerancia a la temperatura, menor consumo de energía que la separación criogénica/alto a muy alto costo

Figura 2.5: Tipos de membranas [9]

2.4 Captura por tecnología de absorción con aminas

La absorción química es el método más maduro tecnológicamente entre los usados para la captura de CO_2, el fundamento físico del mismo se basa en la reversibilidad de las reacciones de neutralización ácido-base, utilizando solventes alcalinos y un gas ácido, el CO_2.

Para realizar la operación de separación se utiliza una torre de absorción, donde se dispone de un sistema en contracorriente para mejorar el contacto entre el solvente y el gas, mejorando la transferencia de materia entre la fase líquida y gas, tras la operación, se dispone de una etapa de regeneración del solvente, en la cual se logra la separación del dióxido de carbono y del solvente, el cual, tras regenerarse en el stripper, se reutiliza en el absorbedor para mejorar la rentabilidad de la instalación. Entre la etapa de absorción y regeneración se dispone de un intercambiador de calor que ayude a mejorar la integración energética, tal y como se muestra en la Figura 2.6.

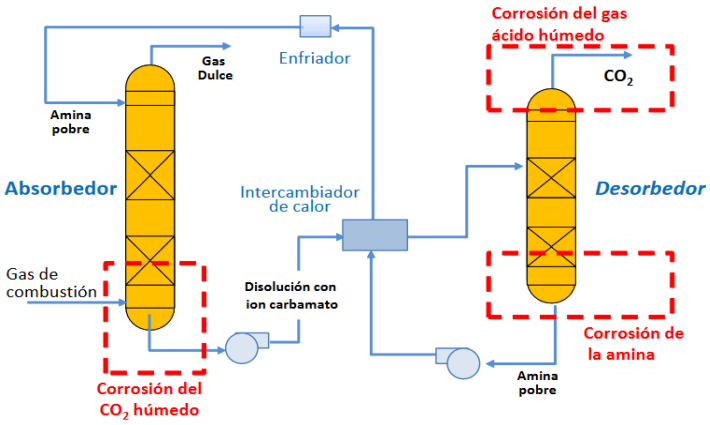

Figura 2.6: Disposición del Sistema de Captura mediante aminas [12]

Para la absorción se suele utilizar alcanolaminas, las cuales pueden ser primarias, secundarias o terciarias, debido a su coste, se suele usar la monoetanolamina (MEA), que es la más destacada entra las aminas primarias. Presenta ventajas frente a aminas secundarias y terciarias, tales como su reactividad y bajo peso molecular, la reacción entre el CO_2 y las aminas primarias generan carbamatos, los cuales se regenerarán posteriormente para reutilizar la amina en el proceso de absorción.

Las aminas secundarias son menos utilizadas debido a su baja velocidad de reacción con el gas, lo que dificulta la operación de transferencia de materia. Las aminas terciarias tienen como principal inconveniente que estas no reaccionan directamente con el CO_2, sino que generan iones bicarbonato a través de la hidrólisis del dióxido de carbono.

Entre los factores que determinan la operación de absorción se destacan:

- Caudales de gas implicados en la operación y composición química de la misma, ello marca el tamaño de la torre necesario para los objetivos de la operación

- Caudales de solvente y CO_2 recuperado, siendo normalmente perteneciente al intervalo del 80

al 95% de recuperación de dióxido de carbono, la cantidad recuperada repercute directamente en los costes de inversión de la planta, ya que a mayor sea la cantidad que se quiere recuperar, mayor será la altura de la torre necesaria, por lo que se establece una cantidad recuperada para no repercutir de forma excesiva en la altura de la torre

- Necesidades energéticas de la instalación, dado que es necesario enfriar los gases de entrada para mejorar la operación de absorción

- Pureza del CO_2 obtenido y cantidad de contaminantes en la corriente gas, teniendo en cuenta que los gases de combustión tienen un contenido en compuestos como el SO_2, SO_3 o NO_2, se trata de minimizar la cantidad de ellos presentes en la corriente de entrada al absorbedor, ya que estos degradan al solvente y, gradualmente, empeoran la calidad de la absorción

2.5 Comparativa de tecnologías de captura

Tras la descripción de las dos tecnologías predominantes en cuanto a captura de CO_2, en el presente apartado se elaborará una comparativa entre ambas tecnologías, aportando unas conclusiones con respecto a la tecnología que finalmente será seleccionada para la Planta proyectada.

Las tecnologías de captura en postcombustión se caracterizan por los distintos principios físicos que rigen el funcionamiento de la operación, ofreciendo variedad de configuraciones en la planta, las cuales pueden incluir el uso de *utilities*, absorbentes específicos para la operación, equipos adicionales para acondicionar corrientes o el uso de membranas para lograr el objetivo de captura. A ello debe sumarse los efluentes que pueda emitir la planta, dado que las operaciones de absorción y de carbonatación-calcinación generan otros tipos de efluentes, adicionales al propio CO_2 y gases contaminantes existentes en el gas de combustión, tales como el efluente líquido del absorbente degradado, el cual requiere tratamiento, y el efluente sólido de CaO eliminado por la purga.

La tecnología de aminas y membranas son ambas utilizadas en la actualidad para realizar operaciones de captura de CO_2, aun siendo las membranas una tecnología relativamente novedosa y en actual desarrollo, se obtienen grandes resultados y asegura ser una alternativa realmente prometedora debido a que no implica el uso de un sorbente externo que requiera de un tratamiento posterior, y por tanto, de un equipo adicional a la propia instalación.

La tecnología de captura por aminas es ampliamente utilizada en la industria, ofreciendo una operación excelente, con un rendimiento muy elevado del 80 al 95 %, dado que la concentración de CO_2 en los gases de combustión es baja, por lo que sus presiones parciales también lo serán. Esto supone un inconveniente a la captura, debido a que la fuerza impulsora es baja [12].

Una desventaja adicional radica en los costes de operación debido a la necesidad de regenerar el sorbente, lo cual puede suponer hasta el 70% de los costes totales de operación. Adicionalmente, la degradación de los absorbente es un factor clave a tener en cuenta a la hora de seleccionar el más adecuado para la operación, por ello es actualmente tema de estudio la creación de nuevos sorbentes que mejoren la operación y hagan frente a la gran degradabilidad presente en los convencionales.

Debido al uso de los sorbentes, y su necesidad de reposición a medida que pierden sus propiedades, se obtiene un efluente líquido que debe tratarse antes de su vertido a red, o su deposición en vertedero, generando por ello un contaminante al medioambiente que genera unos costes adicionales a la planta, por lo que aunque el sistema de captura evite la emisión de contaminantes aéreos en gran medida, tiene, intrínseco al tipo de operación, un nuevo tipo de contaminante, el cual puede ser evitado con la captura por membranas.

Para la regeneración del sorbente, es necesario generar unas condiciones de presión y temperatura más severas que en la propia operación de absorción, por lo que el absorbente, tras ponerse en contacto con el vapor de agua y separar el CO_2, se comprime y se realiza un intercambio de calor con el propio absorbente que proviene de la operación de absorción, aumentando la temperatura y logrando la regeneración del mismo. Posteriormente se somete a un enfriamiento para retornarlo a la torre de absorción. Debido a esa interacción energética entre las corrientes, se logra un ahorro energético ya que no se requiere de un combustible externo para aumentar la temperatura del absorbente, contribuyendo así con la integración energética de la planta. Este sistema puede visualizarse mediante la Figura 2.6.

Además de la generación de efluentes líquidos, para la regeneración del sorbente se requiere del uso de utilities, ya que para realizar la operación de stripping se necesita vapor de agua, el cual se comporta como medio vehicular del CO_2, que sale por cabeza de la torre junto con una fracción del vapor de agua que se elimina en una posterior condensación, dejando así una corriente con alta pureza en dióxido de carbono, superior al 99%. El uso de dichas utilities repercute en los costes de operación de la planta, por lo que sería un factor extra a añadir a la hora de una correcta comparativa entre las dos tecnologías mencionadas.

El principal inconveniente de la tecnología de captura por membranas consiste en la escasa madurez tecnológica de la misma, lo que conlleva a una escasa optimización de los recursos por el reducido conocimiento de las membranas existentes y la necesidad de estudiar nuevas membranas para optimizar el proceso de captura.

Adicionalmente, cabe recalcar la necesidad de aportar energía a la corriente de CO_2 mediante una etapa de compresión y de acondicionamiento de gases, lo cual supone la necesidad de equipos auxiliares que generen las mejores condiciones para la operación, lo que genera un coste añadido a la Planta frente a la absorción química.

En cuanto a los caudales de operación, para Plantas que requieran capturar un gran caudal, es recomendable implementar captura por absorción con aminas, mencionando adicionalmente la gran selectividad presente en las operaciones con aminas, la cual no se presenta en la captura por membranas, que poseen una baja selectividad y por ello requieren de etapas de reciclaje.

Tras la exposición de las ventajas y desventajas de cada uno de las principales tecnologías a estudiar, debido a la alta implementación en la industria de la captura por absorción química y su capacidad para tratar grandes caudales de gases, se elige la absorción como sistema a implementar en la planta proyectada para el presente documento, aun cuando las membranas tienen un futuro prometedor, la falta de uso en la industria y la dificultad técnica para la fabricación de membranas son factores determinantes a la hora de decidir sobre qué sistema implementar en el Proyecto.

3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS INSTALACIONES

En el presente apartado del documento, se mostrarán las características principales de las instalaciones, a nivel de cantidad y tipología de los equipos, dimensiones de equipos y detalles operacionales que diferencian a la captura por tecnología de absorción con aminas, y mediante membranas, con el objetivo de mostrar las diferencias claves desde el punto de vista constructivo y operacional, lo cual será utilizado en el posterior apartado de la vulnerabilidad del Proyecto, con el fin de determinar el que esté sometido a un mayor riesgo.

3.1 Características constructivas de las instalaciones

En cuanto a la captura por absorción con aminas, si bien el diámetro depende directamente del caudal que se trate, y la altura de la eficiencia que se busque, como criterio general, para torres de absorción y desorción, generalmente se obtiene:

- **Altura de Torre de Absorción y Desorción**: Varía entre 10 y 20 metros, en disposición vertical para mejorar el contacto entre el gas de combustión y las aminas, o entre el vapor de agua y la mezcla amina-CO_2 respectivamente. Se realiza una disposición en contracorriente, ya que esta es la que aporta un mayor contacto y, por tanto, una mejor operación. [13]

- **Diámetro de Torre de Absorción y Desorción**: Los diámetros normales comprenden entre 1 y 5 metros, como ya se mencionó previamente, la necesidad de un diámetro mayor es función del caudal que se necesite tratar [13].

- **Equipos y Disposición**: La captura con aminas requiere de equipos auxiliares para una correcta operación, el equipo principal a considerar es el intercambiador de calor intermedio entre el absorbedor y el desorbedor, el cual contribuye a una mayor integración energética en la planta, así como los equipos de pretratamiento de gases, necesarios para un correcto funcionamiento de la captura. El pretratamiento se basa en la eliminación de compuestos indeseados en la corriente, como los NO_x y SO_x. Cabe mencionar la disposición de este sistema, ya que, debido a la reutilización de la amina regenerada, es necesario implementar una red de tuberías que permitan la recirculación de dicho compuesto.

Cabe destacar que las operaciones de acondicionamiento de la corriente pueden ser realizadas por diversos métodos, entre los que se encuentran también el uso de torres de absorción, como es el caso para la eliminación de SO_x, aunque es remarcable el hecho de que existan varias alternativas a esto, entre la que se destaca el scrubber horizontal, el cual opera de forma idéntica al scrubber vertical, ocupando un mayor espacio en la planta, pero con una altura muy reducida, entre 1,5 y 3 metros, si bien las alturas para los scrubbers verticales están entre los 5 y 7 metros, la facilidad de mantenimiento resulta ser un elemento de decisión clave. Adicionalmente, este equipo horizontal contribuye a una mayor facilidad de mantenimiento debido a la accesibilidad de todas las zonas del equipo. [14]

En cuanto a la eliminación de NO_x, este se realiza principalmente mediante reactores

catalíticos selectivos (SCR), cuya altura no sobrepasa los 4 metros en el escenario más restrictivo. El principio de funcionamiento de este equipo se basa en la reacción química de los gases contaminantes con una corriente de urea o amoniaco para la generación de nitrógeno y agua, normalmente con catalizadores de óxidos de metales como el Vanadio o el Molibdeno. El equipo ofrece una reducción de los NO_x hasta en un 95%. [15]

De igual forma ocurre con la eliminación de material particulado, ya que este puede llevarse a cabo mediante equipos como los filtros de manga o los electrofiltros, cuya altura típica ronda entre los 3 y 6 metros. El principio de funcionamiento del electrofiltro se basa en la aplicación de fuerzas eléctricas para la separación de las partículas en el gas de combustión, este equipo cuenta con rendimientos del 99% de eliminación de material particulado, siendo muy eficientes para aplicaciones industriales. [16]

La captura por membranas requiere de un menor esfuerzo constructivo, dado que esta operación se realiza únicamente con una etapa de compresión, equipos de pretratamiento de gases y el banco de membranas que permite la separación de los compuestos en la corriente. Las principales características de la instalación son:

- **Dimensiones del banco de membranas**: Las dimensiones de los bancos de membranas usados para captura dependen del caudal y eficiencia buscados. Unos valores intermedios para las dimensiones son: Longitud entre 1 y 2 metros, con un diámetro de filtro entre 10 y 100 milímetros [17] [18]
- **Equipos y Disposición**: La captura mediante membranas necesita una etapa previa de compresión para otorgar la fuerza impulsora necesaria para el proceso de separación. Adicionalmente, se dispone de un sistema de pretratamiento de gases, previo a la compresión del gas de combustión, por el cual se retiran compuestos perjudiciales para las membranas, tales como los SO_x y NO_x, además de la eliminación de partículas en la corriente. A diferencia del caso de las aminas, los procesos con membranas no suelen requerir normalmente de realimentación, lo que supone un menor esfuerzo constructivo por una menor complejidad del trazado de tuberías.

Debido a que la captura por membranas requiere también de los mismas operaciones de acondicionamiento de la corriente, se puede concluir que, si bien estos equipos no tienen por qué ser exactos en dimensiones con respecto a la captura con aminas debido al caudal que traten, si serán necesarios los mismos equipos para lograr una correcta operación del sistema de captura con membranas.

3.2 Características operacionales de las instalaciones

El estudio de ambas instalaciones se completa mediante la inclusión de factores operacionales, útiles para la comprensión del sistema de captura y la determinación de límites en la operación. Los factores operacionales más importantes para la captura mediante absorción con aminas son:

- **Límite de la temperatura del sistema**: La captura mediante absorción con monoetanolamina tiene como limitación el punto de llama del compuesto absorbente, cuyo riesgo empieza a ser alto a partir de 85 ºC. El punto de llama se define como la temperatura mínima a la que un líquido inflamable emite suficiente vapor para formar una mezcla inflamable la cual, en presencia de una fuente de ignición, es capaz de prender [19].

- **Requerimientos energéticos**: El uso de compresores para los gases de combustión mejora el proceso de absorción, si bien es necesario realizar un análisis económico para determinar si es una situación rentable, puede realizarse la operación a presión atmosférica, lo cual disminuiría los costes energéticos, así como la eficiencia de absorción. Debido al sistema de desorción, es necesario un constante aporte energético para la generación de vapor y posterior condensación para separar el CO_2 completamente.

  Debe considerarse dentro de los requerimientos energéticos de la Planta los sistemas de impulsión presentes, en el caso de la absorción, bombas para el desplazamiento de la amina, así como el enfriador situado en la recirculación de la amina regenerada, cuyo fluido refrigerante aporta un incremento a los requerimientos energéticos.

  Adicionalmente, se consideran también como costes operacionales los sistemas de depuración de gases presentes en la instalación, el sistema de abatimiento de partículas, equipo de desulfuración en caso de que el combustible poseyera azufre en su estructura, así como el abatimiento de los NO_x generados en el proceso, si bien estos no forman parte directa del sistema de absorción, forman una pieza fundamental en el éxito de la captura.

En términos de características operacionales, las membranas necesitan de una menor energía debido a la sencillez en su sistema de separación, si bien el problema de esta tecnología se basa en la generación de un sólido poroso cuya afinidad sea alta con el CO_2, que tenga buena resistencia química y térmica, así como un coste reducido, en cuanto a coste operacional, supone una mejora considerable frente a la tecnología de aminas. Los parámetros más relevantes a estudiar son:

- **Límite de la temperatura del sistema**: Debido al uso de un sólido poroso en lugar de un líquido inflamable se observa que la temperatura necesaria para degradar el comportamiento de la membrana es significativamente mayor a la necesaria para degradar las aminas. Para el caso de una membrana microporosa de sílice, se observa que hasta los 550-600 ºC, el comportamiento de la membrana permanece intacto, mientras que temperaturas superiores empiezan a degradar su comportamiento debido a la densificación de su estructura porosa, lo que reduce su permeabilidad y por tanto, funcionamiento como medio poroso [20]

- **Requerimientos energéticos**: A nivel de equipos, es necesario un sistema de compresión hasta 15-20 bar, para aportar la fuerza impulsora suficiente al proceso de separación. Adicionalmente, se requiere de un sistema de abatimiento de partículas, así como un proceso de desulfuración en caso de existir azufre en el proceso y, finalmente, un sistema de eliminación de NO_x.

  Debido a que, para ambas instalaciones, el sistema de pretratamiento es común, a nivel de

comparativa en los requerimientos energéticos de cada planta, las membranas resultan ser un proceso energéticamente más rentable.

En vista de los diferentes parámetros estudiados en este capítulo, se pueden diferenciar claramente los dos procesos de captura, requiriendo, en caso de las aminas, un mayor número de equipos y energía para llevar a cabo la separación. Si bien estos factores no son determinantes para la selección final del tipo de tecnología a aplicar en la planta, son elementos a tener en cuenta para la realización de un análisis económico previo.

Cabe mencionar que en el presente apartado del documento no se han considerado los costes de la materia necesarios para operar, los costes de tratamiento y gestión de residuos en ambos proyectos, la necesidad de paradas en la planta para reponer las membranas ni las *utilities* necesarias en la operación, factores importantes a tener en cuenta para los análisis de alternativas previos a la ejecución del Proyecto.

4 LEGISLACIÓN BASE DEL PROYECTO

El objetivo del presente capítulo del documento consiste en la explicación de las bases legislativas existentes para proyectos sometidos a evaluación de impacto ambiental, así como el contenido de la misma. Para ello se determinará una ubicación para el Proyecto de captura de CO_2, de forma que su implementación suponga un avance en materia de emisiones a la atmósfera.

4.1 Ubicación del proyecto

A nivel legislativo, la ubicación de los Proyectos tiene gran importancia, ya que según en la comunidad en la que se lleve a cabo el Proyecto, pueden existir diferencias en áreas como la gestión ambiental. Por ello, se justifica la ubicación del Proyecto previo a la explicación de las leyes de aplicación.

En España, los tres sectores con mayor generación de CO_2 son el sector transporte (27,7%), el sector industrial (21,4%) y el sector agrícola y ganadero (14,1%) [21], dentro del sector industrial, las cementeras son un foco importante de emisiones de CO_2. Por ello, se ha decidido situar la Planta objeto de este trabajo en la Cementera Portland Valderrivas de Alcalá de Guadaira, Sevilla.

En el año 2022, la cementera Portland de Alcalá contribuyó a las emisiones de CO_2 con 667.000 toneladas, según datos del registro PRTR (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes), número que viene en aumento desde el año 2020, donde las emisiones de CO_2 fueron de 533.000 toneladas [22]. Dado que la industria está en proceso de descarbonización, la creación de una instalación de captura de CO_2 en un foco creciente de emisiones, queda justificada.

4.2 Estudio de impacto ambiental

El estudio de impacto ambiental es un documento técnico de proyectos cuya finalidad es evaluar el impacto que los proyectos tienen sobre el medioambiente. La regulación principal de este documento viene dado a nivel estatal por la Ley 21/2013 del 9 de diciembre de evaluación ambiental [23]

El tipo de Proyecto seleccionado requiere de evaluación de impacto ambiental, esto puede observarse en el propio contenido de la Ley 21/2013, específicamente en los Anexos I y II, en los que se indican los Proyectos sometidos a evaluación ambiental ordinaria y simplificada respectivamente. Los Proyectos de captura de CO_2 se encuentran en el grupo 9, número 21 apartado d), en el que se menciona lo siguiente:

"*d) Instalaciones para la captura de flujos de dióxido de carbono con fines de almacenamiento geológico de conformidad con la Ley 40/2010, de 29 de diciembre, de almacenamiento geológico de dióxido de carbono, procedente de instalaciones incluidas en este anexo, o cuando la captura total anual de dióxido de carbono sea igual o superior a 1,5 Mt*" [23]

En cuanto a las partes principales que componen el estudio de impacto ambiental, el

contenido mínimo que este debe desarrollar viene marcado por la misma Ley 21/2013 descrita anteriormente, en su Artículo 35, dicho contenido es [24]:

- Descripción general del proyecto con su ubicación, diseño, dimensiones y otras características

- Descripción de las alternativas al proyecto, incluyéndose la alternativa cero o de no realización del proyecto

- Identificación, descripción y análisis de los posibles efectos, directos, indirectos, secundarios, alternativos y sinérgicos sobre la población, salud humana, flora, fauna, suelo subsuelo, aire y agua entre otros

- Apartado específico de la vulnerabilidad del proyecto ante incidentes graves o de catástrofes, sobre el riesgo de que se produzcan dichos incidentes o catástrofes y los probables efectos adversos significativos sobre el medioambiente en caso de ocurrencia de los mismos. Es destacable mencionar, que la obligación del Promotor de realizar el estudio de vulnerabilidad del Proyecto vino reflejado en la Ley 9/2018 de 5 de diciembre, por la cual se modifica la Ley 21/2013 de 9 de diciembre, de evaluación ambiental [25]

- Medidas preventivas, correctoras o compensatorias de los efectos causados

- Programas de vigilancia ambiental

- Resumen no técnico del EIA y conclusiones

Cabe mencionar la existencia del Real Decreto 815/2013 de 18 de octubre por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación, en dicho Real Decreto se establece el régimen jurídico a aplicar a las emisiones provenientes de la actividad industrial, asimismo dispone de normativas específicas a cumplir por diferentes tipos de industrias. Los proyectos de captura de CO_2 deben cumplir con las regulaciones de emisiones industriales descritas en el Real Decreto [26]

Es de aplicación el Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre, el cual aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación. Entre sus principales disposiciones se encuentra la Autorización Ambiental Integrada, AAI, en la que se establece su régimen. Adicionalmente, se establecen límites de emisión para diferentes contaminantes y el uso de las mejores técnicas disponibles, MTD´s.

En el Anexo I de la Ley IPPC, se especifican las actividades industriales objeto de esta ley, entre las que se encuentran las actividades de captura de CO_2. Debido a que la actividad de captura es

recogida por la Ley IPPC, a esta le aplican las MTD´s fijadas a nivel europeo, estas técnicas son un conjunto de prácticas y tecnologías que se consideran las más efectivas en cuanto a la reducción de emisiones, estas técnicas se documentan en los Documentos de Referencia sobre Mejores Técnicas Disponibles, BREF.

Tras la breve descripción del contenido del EIA, así como la legislación de aplicación, en el siguiente apartado del documento se desarrolla la vulnerabilidad del proyecto frente a catástrofes naturales, efectos derivados del cambio climático y frente a accidentes graves, aunque este último no se incluye en el alcance del presente documento.

5 VULNERABILIDAD DEL PROYECTO

El presente apartado del documento contiene una introducción a la vulnerabilidad de Proyectos, así como la forma de cuantificación de los riesgos en función de variables, las cuales son mencionadas y explicadas a lo largo del documento. Asimismo, se desarrolla el estudio de la vulnerabilidad del Proyecto proyectado tras haber encuadrado los elementos necesarios para su realización.

El estudio de la vulnerabilidad de un proyecto es uno de los documentos que conforman el estudio de impacto ambiental, el contenido del documento de vulnerabilidad es la valoración de como las diferentes catástrofes naturales como terremotos o incendios afectan o pueden afectar al proyecto, estudiando el emplazamiento del proyecto y valorando pseudocuantitativamente el riesgo que corre un proyecto en ese emplazamiento. Además de ello, el documento de vulnerabilidad contempla el riesgo ante accidentes graves debido al uso de diferentes sustancias químicas que puedan suponer un riesgo a la planta, tanto por su uso como almacenaje, este riesgo puede verse acrecentado en según qué circunstancias, como puede ser un fuego externo en caso de tener sustancias inflamables en la instalación, por lo que resulta importante el estudio de dichas sustancias. Finalmente, se realiza un análisis de como un cambio en las condiciones meteorológicas puede afectar a la planta, ya sea por el incremento en la temperatura ambiente, como una disminución drástica de la lluvia en el emplazamiento del proyecto.

Cabe mencionar que, debido al alcance del proyecto, el análisis ambiental de la vulnerabilidad se centrará en el análisis frente a catástrofe naturales y ante los efectos derivados del cambio climático, dejando así sin analizar los efectos debido a los posibles accidentes graves.

Todos los estudios previamente mencionados concluyen su estudio con una matriz de riesgo, en la cual se muestra, mediante una escala numérica, el riesgo que supone cada una de las variables estudiadas al proyecto. Dicha escala vendrá desarrollada en el estudio de vulnerabilidad que se realizará en el presente documento. Cabe mencionar que no solo los riesgos tienen un papel clave en la vulnerabilidad de un proyecto, sino que también lo es **la capacidad de adaptación de la planta frente a dicha problemática**, los factores que determinan la capacidad de adaptación son [27]:

- Planificación gubernamental y empresarial
- Economía del Proyecto
- Infraestructuras del Proyecto
- Información y conocimiento de los agentes sociales

Cada una de las variables citadas será desarrollada en el documento de vulnerabilidad que se desarrolla en el presente documento.

5.1 Análisis ambiental de la vulnerabilidad del proyecto

La Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental, modificada por la Ley 9/2018, de 5 de diciembre, incorpora la necesidad de abordar los estudios de impacto ambiental frente a los efectos ante el cambio climático, accidentes graves y fenómenos meteorológicos, aunque como se mencionó previamente en el presente documento, se centrará el análisis exclusivamente en los efectos relacionados con el medioambiente.

La ley 21/2013, en el artículo 5.3 aporta una definición sobre la vulnerabilidad de los proyectos, siendo esta definición la siguiente [24]:

f) "Vulnerabilidad del proyecto": características físicas de un proyecto que pueden incidir en los posibles efectos adversos significativos que sobre el medio ambiente se puedan producir como consecuencia de un accidente grave o una catástrofe.

Teniendo en cuenta lo anterior, se procede a realizar la evaluación de la vulnerabilidad ambiental del Proyecto de una instalación de captura de CO_2 con tecnología de absorción con aminas en una parcela próxima a la Fábrica de Cemento Portland en Alcalá de Guadaira (Sevilla), de aquí en adelante, el Proyecto, frente a catástrofes naturales y efectos derivados del cambio climático. Si bien el análisis se realiza con tecnología de aminas, se mencionará en cada apartado las posibles diferencias desde el punto de vista de la vulnerabilidad, si el Proyecto fuera de membranas, con el objetivo de encontrar las diferencias que pueda haber dependiendo del tipo de tecnología implantada

La realización del capítulo mencionado se realiza respecto a la metodología basada en publicaciones del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Siendo el índice utilizado para el presente capítulo:

5.1.1 Metodología del análisis de vulnerabilidad ambiental

5.2 Vulnerabilidad Ambiental del proyecto ante catástrofes naturales

5.3 Vulnerabilidad del Proyecto frente a los efectos ambientales derivados del cambio climático

5.4 Vulnerabilidad ambiental global del Proyecto

5.1.1 Metodología del análisis de vulnerabilidad ambiental

Para llevar a cabo la evaluación de la vulnerabilidad del Proyecto de captura de CO_2 con tecnología de absorción por aminas se ha aplicado como base la metodología expuesta en el documento *"Evaluación de los impactos y la vulnerabilidad en el sector privado. Caso piloto: Ferrovial"*, publicado por el entonces Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente en el año 2014 [28].

Para el desarrollo del presente apartado se ha tomado como referencia el análisis de vulnerabilidad ambiental incluido en el estudio de impacto ambiental: Planta de baterías de iones de litio en Navalmoral de la Mata (Cáceres) [27], el cual fue sometido al trámite de información público durante el mes de noviembre de 2022 [29]. Dicho documento sirve como base dado que el contenido del estudio de vulnerabilidad presente en el documento cumple con lo requerido para el mismo según la Ley 21/2013.

La vulnerabilidad ambiental es un concepto múltiple, ya que incluye la exposición o grado al cual un sistema entra en contacto con un factor de riesgo en particular, sensibilidad (grado de afección de un sistema al exponerse) y resiliencia (capacidad de resistir o recuperarse del daño asociado a un riesgo).Por tanto, la vulnerabilidad depende tanto de la probabilidad y consecuencia del riesgo asociado, así como de la capacidad de actuación, de modo que a mayor sea la severidad del riesgo y menor la capacidad de adaptación, mayor será la vulnerabilidad del elemento receptor del riesgo.

En base a lo anterior, se describe la metodología para la determinación del análisis de vulnerabilidad ambiental del Proyecto. Siendo los pasos a seguir los siguientes:

- **1. Identificación de los principales impactos ambientales**. Los impactos a valorar son:
    - Catástrofes naturales.
    - Cambio climático.

- **2. Identificación de los riesgos asociados a los impactos analizados.** Se analiza la probabilidad de ocurrencia de los diferentes impactos ambientales identificados y sus consecuencias

- **3. Evaluación de la capacidad de adaptación.** Se evalúa la capacidad de adaptación de las instalaciones que abarca el proyecto.

- **4. Análisis de vulnerabilidad.** Mediante análisis de riesgo y capacidad de adaptación, se define la vulnerabilidad del Proyecto respecto a las variables previamente mencionadas.

Se muestran los componentes de desarrollo de la metodología en la Figura 5.1

Figura 5.1: Metodología de vulnerabilidad [28]

5.1.1.1 Identificación de los riesgos

Se define riesgo como el impacto sobre los sistemas humanos o naturales de un evento o daño a lo largo del tiempo, este se cuantifica como el producto de la probabilidad de que ese riesgo suceda, multiplicado por las consecuencias que ello tendría, quedando, por tanto:

$$Riesgo\ (R) = Probabilidad\ x\ Consecuencia \quad \text{[Ec. 5]}$$

Para la determinación de la probabilidad, se recurre a la clasificación en seis categorías según su probabilidad de ocurrencia, desde improbable (1) a muy probable (6), asignando valores entre 0 y 10 según la Tabla 5.1 [27]:

Tabla 5.1:

Grado de probabilidad de los impactos

Probabilidad						
Probabilidad	**Improbable**	**Muy poco probable**	**Poco probable**	**Probable**	**Bastante probable**	**Muy probable**
Grado	1	2	3	4	5	6
Puntuación	3	4	5	7	9	10

Descripción de la probabilidad de ocurrencia:

- **Improbable:** Excepcionalmente improbable que suceda
- **Muy poco probable:** Muy improbable que suceda
- **Poco probable:** Improbable que suceda
- **Probable:** Es tan probable que suceda como que no
- **Bastante probable:** Es probable que suceda

- **Muy probable:** Muy probable que suceda

En cuanto a la determinación de las consecuencias, ocurre de manera similar, se clasifican en siete categorías en función de su importancia o magnitud, con una puntuación entre 0, para grado despreciable, hasta 10, que indicaría un grado muy grave, la Tabla 5.2 muestra la información previamente mencionada [27]

Tabla 5.2:

Grado de consecuencia de los impactos

Puntuación	Grado	Afecciones económicas y de operatividad	Daños físicos	Afecciones en materia de seguridad
0	Despreciable	Sin repercusiones	Sin daños físicos	Sin repercusiones
3	Mínima	Repercusiones irrelevantes en las cuentas anuales	Daños físicos irrelevantes	Sin repercusiones
4	Menor	Repercusiones asumibles en las cuentas anuales	Daños físicos leves	Sin repercusiones
5	Significativa	Repercusiones notables en las cuentas anuales, pero asumibles	Daños físicos notables	Sin repercusiones
7	Importante	Repercusiones importantes en las cuentas anuales, asumible con mayor dificultad	Daños físicos importantes pero asumibles	Repercusiones mínimas
9	Grave	Graves repercusiones en las cuentas anuales, contemplable la posibilidad de cierre	Daños físicos difíciles de asumir	Repercusiones de poca envergadura y asumibles
10	Muy grave	Repercusiones económicas exigen el cierre o renovación total	Daños físicos no asumibles	Puede tener repercusiones no asumibles

Finalmente, una vez definidas las variables del riesgo, estas se cruzan en una matriz para

obtener el riesgo resultante. Los resultados se muestran en la Tabla 5.3 [28]

Tabla 5.3:

Matriz de índices de riesgo

Índice de riesgo		**Consecuencia**						
		Despreciable	Mínima	Menor	Significativa	Importante	Grave	Muy grave
Probabilidad	Improbable	0	9	12	15	21	27	30
	Muy poco probable	0	12	16	20	28	36	40
	Poco probable	0	15	20	25	35	45	50
	Probable	0	21	28	35	49	63	70
	Bastante probable	0	27	36	45	63	81	90
	Muy probable	0	30	40	50	70	90	100

Tras elaborar la matriz de riesgos, se pueden categorizar los riesgos en función de su puntuación, esta se muestra en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4:

Tipología de riesgo

Riesgo	Magnitud	Categoría	Tipología
Muy alto	≥90	5	R5
Alto	≤50-90	4	R4
Medio	≤30-50	3	R3
Bajo	≤20-30	2	R2
Muy bajo	>0-20	1	R1
Despreciable	0	0	R0

5.1.1.2 Determinación del grado de adaptación

La capacidad de adaptación se define como la habilidad del sistema para ajustarse a cambios en el clima, amortiguar daños y lidiar con consecuencias negativas derivadas mediante el uso de tecnologías y recursos. Está directamente relacionado con la resiliencia, la cual se define a su vez como la capacidad del sistema de absorber posibles afecciones, así como la capacidad de auto organización y de adaptación al cambio.

Se definen cuatro variables de adaptación:

- **Variables transversales:** Se trata de la planificación gubernamental y empresarial en materia de regulación políticas o de prevención de riesgos

- **Variables económicas:** Se refiere a la disponibilidad de recursos económicos y disponibilidad de estructuras para hacer frente a los riesgos.

- **Variables técnicas:** Necesidad de infraestructuras.

- **Variables sociales:** Conocimiento del riesgo y oportunidades, disponibilidad de información de la organización y sus agentes claves, grado de implicación del personal, clientes y comunidades del entorno.

Se otorgan valores del 1 al 7 según la capacidad de adaptación de la planta, según se muestra en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5:

Capacidad de adaptación

Capacidad de adaptación					
Clasificación	Despreciable (CA0)	Mínima (CA1)	Media (CA2)	Significativa (CA3)	Importante (CA4)
Grado	0	1	2	3	4
Puntuación	7	5	4	3	1

Siendo, por tanto:

- **CA4:** Se disponen de las cuatro variables
- **CA3:** Se disponen de tres de las variables

- **CA2:** Se disponen de dos variables
- **CA1:** Se dispone de una única variable
- **CA0:** No se disponen de variables

5.1.1.3 Caracterización de la vulnerabilidad ambiental

Tras el fundamento teórico de las variables implicadas en el riesgo y capacidad de adaptación, se define vulnerabilidad como el producto del riesgo por la capacidad de adaptación. Debido a los posibles valores que ambas variables pueden tomar, se concluye que el rango de valores posibles comprenderá entre 0 y 700, debido al valor del riesgo (0-100) y la capacidad de adaptación (0-7). La fórmula que define la vulnerabilidad quedaría, por tanto:

$$Vulnerabilidad = Riesgo\ x\ Capacidad\ de\ adaptación \qquad \text{[Ec.6]}$$

Se muestra en forma de tabla los posibles valores que puede tomar la vulnerabilidad de un proyecto ante una determinada amenaza, según la Tabla 5.6:

Tabla 5.6:

Vulnerabilidad del sistema a una determinada amenaza

		Capacidad de adaptación				
		CA0	CA1	CA2	CA3	CA4
Riesgo	R0	0	0	0	0	0
	R1	140	100	80	60	20
	R2	210	150	120	90	30
	R3	350	250	200	150	50
	R4	630	450	360	270	90
	R5	700	500	400	300	100

Los valores obtenidos de esta manera, define las diferentes tipologías de vulnerabilidad, que se clasifican según el siguiente criterio, mostrado en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7:

Tipología de la vulnerabilidad

Tipologías de vulnerabilidad	Riesgo	Magnitud	Clase	Tipología
	Muy alto	≥500	5	V5
	Alto	≤300-500	4	V4
	Medio	≤200-300	3	V3
	Bajo	≤100-200	2	V2
	Muy bajo	>0-100	1	V1
	Despreciable	0	0	V0

Describiéndose la tipología como:

- **V5:** Vulnerabilidad muy alta, urgente tomar acciones.
- **V4:** Vulnerabilidad alta, es necesario tomar acciones.
- **V3:** Vulnerabilidad media, es recomendable tomar acciones.
- **V2:** Vulnerabilidad baja, necesario seguimiento, pero no acciones.
- **V1:** Vulnerabilidad muy baja, no es necesario tonar acciones preventivas o adaptativas.
- **V0:** Vulnerabilidad despreciable.

5.2 Vulnerabilidad ambiental del Proyecto ante catástrofes naturales

El presente capítulo contiene el estudio de la vulnerabilidad frente a catástrofes naturales aplicado al Proyecto proyectado, si bien el apartado anterior del documento explicaba las bases generales para un estudio de vulnerabilidad aplicado a un Proyecto cualquiera, el presente apartado y los siguientes del documento contienen información específica de la Planta proyectada, localización y condiciones propias.

Según el artículo 5 de la Ley 9/2018, se define el término catástrofe natural como:

"Catástrofe": suceso de origen natural, como inundaciones, subida del nivel del mar o terremotos, ajeno al proyecto que produce gran destrucción o daño sobre las personas o el medio ambiente [25]

Aunque existan gran variedad de catástrofes naturales a estudiar, se considera que las de mayor importancia, debido a la localización del proyecto, son:

- Condiciones meteorológicas adversas
- Inundaciones
- Incendio exterior
- Sismicidad

Catástrofes naturales como los huracanes o volcanes no se tendrán en cuenta a la hora de valorar su impacto, debido a su escaso o nulo impacto sobre el Proyecto, debido a su localización.

5.2.1 Condiciones meteorológicas adversas

El estudio de la climatología se realiza mediante una comparación respecto a los niveles de aviso de la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología), para ello se localiza la zona del Proyecto y se visualizan los valores límite que interesan según las variables a estudiar, estos valores se muestran en la Tabla 5.8 [30]:

Tabla 5.8:

Niveles de aviso meteorológico: Campiña sevillana

	Niveles de alerta AEMET		
	Amarillo	Naranja	Rojo
Temperatura máxima (ºC)	38	40	44
Temperatura mínima (ºC)	-1	-4	-8
Rachas máximas de viento (km/h)	70	90	130
Precipitaciones acumuladas en 12 h (mm)	40	80	120

Conociendo los valores límites de AEMET, se pueden realizar gráficas según el histórico de datos adquiridos por la estación meteorológica más cercana al emplazamiento del proyecto, siendo esta estación la de Sevilla San Pablo, con indicativo 5783, la cual se encuentra a 7 kilómetros aproximadamente del emplazamiento del Proyecto.

La elaboración de las siguientes figuras se realiza de forma propia, usando los datos elaborados por AEMET [31]. La Figura 5.2 muestra la temperatura máxima de cada día en los últimos 30 años, con el fin de verificar el número de ocasiones en las que se han superado los distintos niveles de alerta

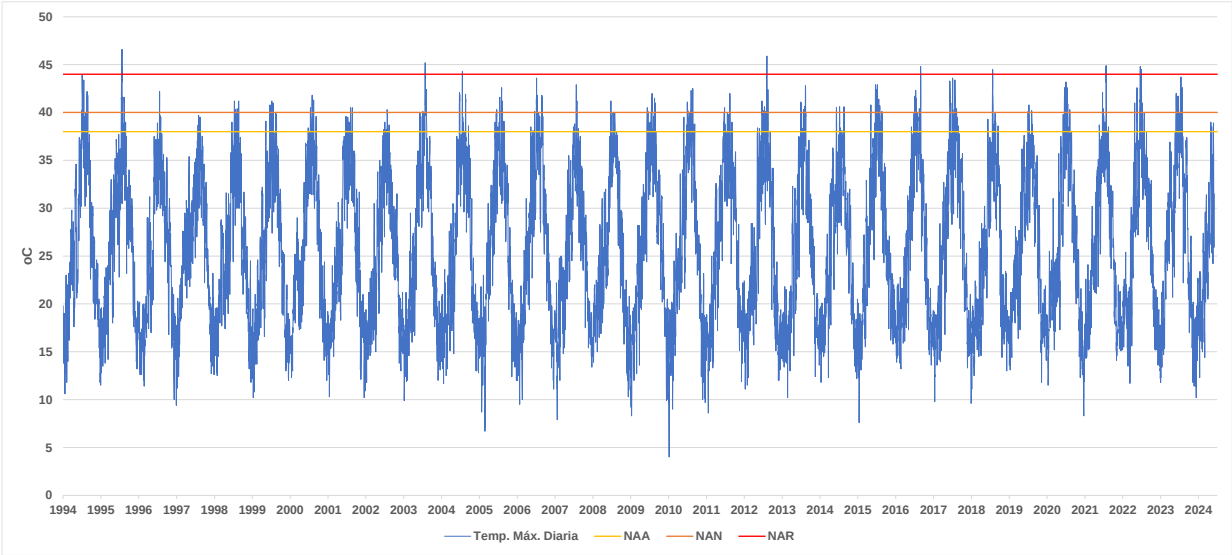

Figura 5.2: Temperatura máxima diaria. Estación meteorológica Sevilla San Pablo

En vista de los resultados obtenidos, se observa que se sobrepasa en numerosas ocasiones tanto el nivel de alerta amarillo y naranja, y que el nivel rojo es superado en contadas ocasiones, siendo en julio de 2022 donde se alcanzó dicho nivel en dos ocasiones. La temperatura máxima registrada en el tiempo de estudio fue de 45,6 ºC, en julio de 1995

La Figura 5.3 muestra el equivalente a la Figura anterior, pero mostrando las temperaturas mínimas diarias.

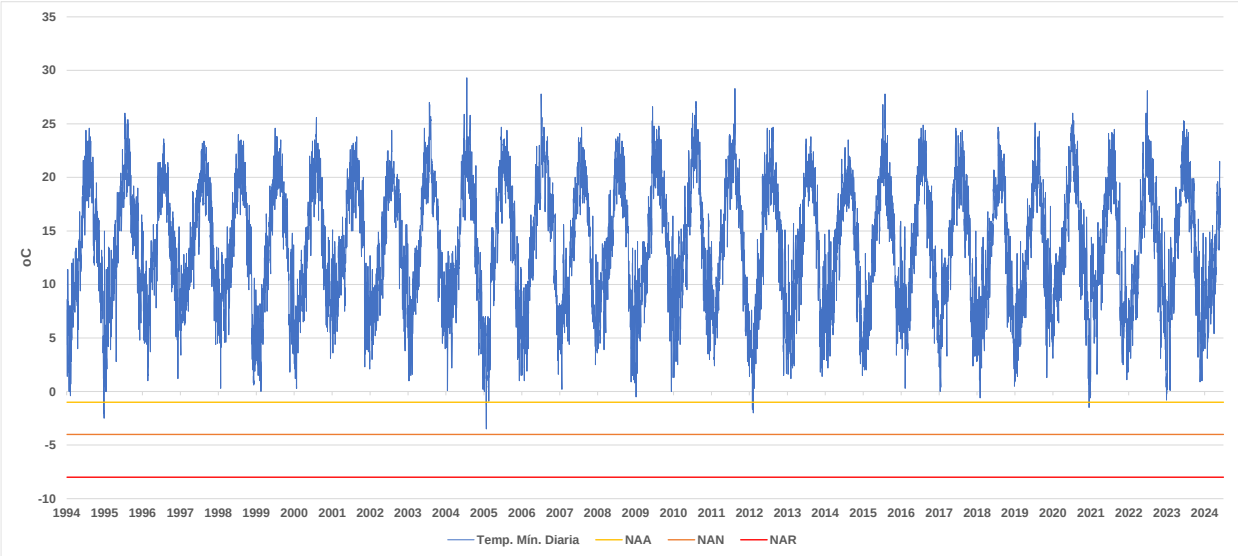

Figura 5.3: Temperatura mínima diaria. Estación meteorológica Sevilla San Pablo

Se observa que el nivel de alerta amarillo llega a sobrepasarse en pocas ocasiones, quedándose lejos del umbral rojo, y algo más próximo del umbral naranja. La temperatura mínima registrada en el periodo de estudio es de -4 ºC, en febrero de 2005

En la Figura 5.4 se muestran las velocidades máximas del viento en los últimos 30 años.

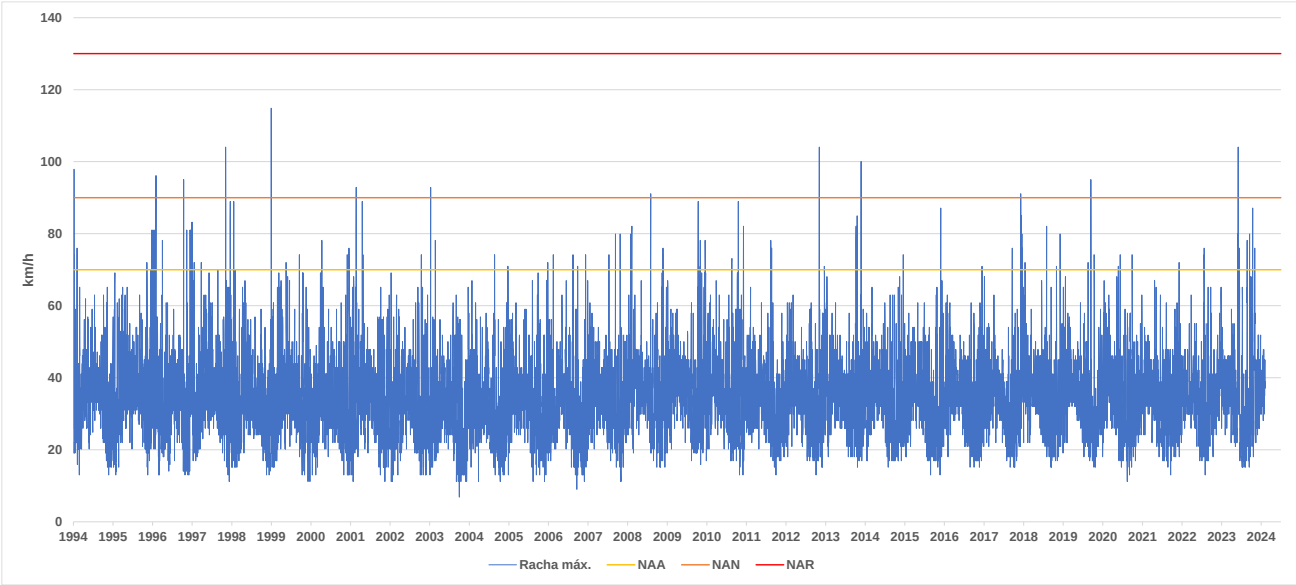

Figura 5.4: Velocidad máxima diaria del viento. Estación meteorológica Sevilla San Pablo

Se puede observar que las velocidades quedan lejos de llegar al umbral rojo, y que el umbral naranja se alcanzó en contadas ocasiones en los últimos 30 años, aunque cabe mencionar que el umbral amarillo si se alcanzó en numerosas ocasiones, siendo más habitual en la segunda mitad del año. En cuanto al máximo, este se da en diciembre de 1998, con una velocidad máxima de 114,84 km/h.

Finalmente, la Figura 5.5 muestra las precipitaciones acumuladas en 24 horas. Cabe mencionar que los umbrales aportados por AEMET son precipitaciones acumuladas en 12 horas, por lo que los valores no son comparables en magnitud, aunque si es posible obtener conclusiones a raíz de ellos, ya que, si el valor para 24 horas no supera el umbral otorgado por AEMET de 12 horas, se puede concluir que este valor tampoco se superará para 12 horas.

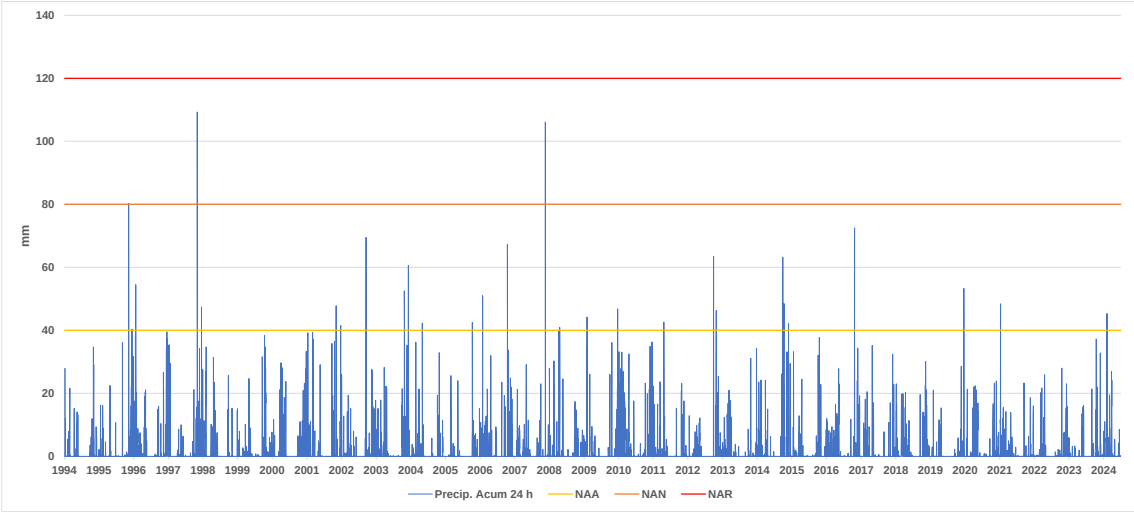

Figura 5.5: Precipitación acumulada diaria. Estación meteorológica Sevilla San Pablo

En base a los resultados obtenidos, podemos observar que no se alcanzó el umbral rojo, mientras que el umbral naranja se alcanzó 3 veces en los últimos 30 años, asimismo, el umbral amarillo fue superado en contadas ocasiones. El valor máximo en el periodo de estudio fue de 109,3 milímetros,

en noviembre de 1997.

Por lo tanto, en vista de los valores obtenidos en las figuras, se considera que las probabilidades de que se den condiciones meteorológicas adversas que puedan comprometer al funcionamiento de la planta es **poco probable.**

En cuanto a las posibles consecuencias que puedan tener estos fenómenos, comentar que una racha de viento de alta velocidad puede comprometer al suministro de la planta o a la caída de equipos, fuertes lluvias podrían ocasionar pequeñas inundaciones en el entorno de la planta que podrían comprometer a la seguridad del personal de la planta, así como al movimiento normal de los operarios. Las temperaturas altas podrían afectar a las condiciones de trabajo, así como una temperatura baja, que podría generar pequeñas heladas que generasen accidentes laborales.

En vista de lo anterior, se concluye que las consecuencias de variaciones climatológicas serán **mínimas** para el Proyecto.

Cabe recalcar que, en cuanto a las condiciones meteorológicas adversas estudiadas en este apartado, no existe una diferencia entre Proyectos, dado que ambos estarían situados en la misma localización, por lo que las condiciones meteorológicas serán las mismas, si bien es cierto que, debido a factores constructivos, se puede afirmar que **el Proyecto de captura mediante aminas es más vulnerable** que el Proyecto de captura mediante membranas, ya que la torre de absorción y desorción, debido a su altura aproximada de entre 10 y 20 metros sufre en mayor proporción ante fuertes vientos que el banco de membranas, cuya altura, si bien es variable dependiendo de la cantidad de membranas, no suele superar los 2 metros de altura.

b) Inundaciones

Para el estudio de la inundabilidad de la zona se consulta la información disponible en el visor GeoPortal, del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, tal y como se muestra en la Figura 5.6.

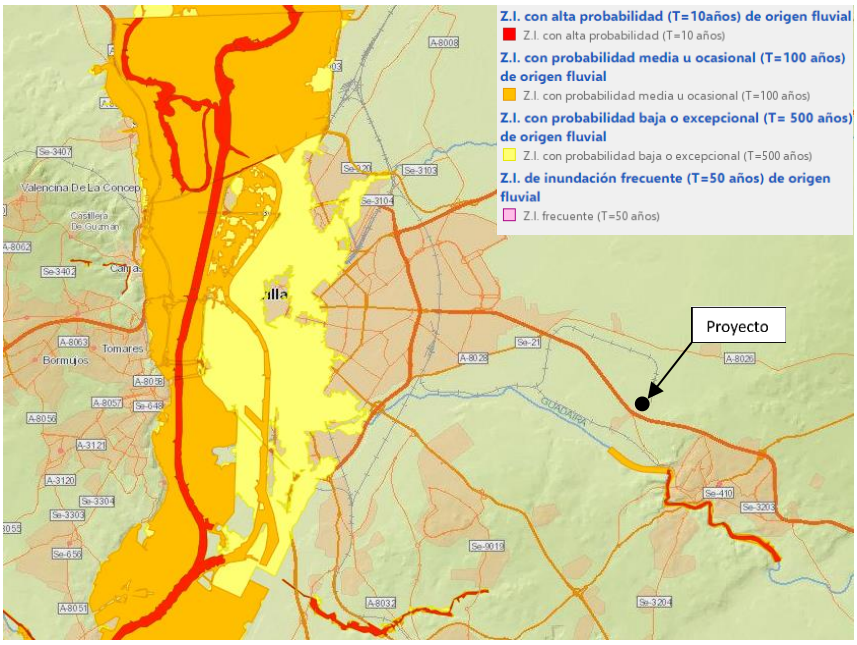

Figura 5.6: Zonas Inundables [32]

Según se muestra en la figura, se observa que la zona del Proyecto se encuentra a una distancia considerable de las zonas inundables, por lo que se considera **improbable** que ocurra una inundación en el emplazamiento del Proyecto. Se considera, además, que las consecuencias de una inundación no supondrían un gran problema para el normal funcionamiento de la planta, por lo que estas consecuencias serían **despreciables**.

En cuanto a inundaciones, **el Proyecto de captura mediante membranas es más vulnerable**, debido a la escasa altura de la estructura, si bien se evitaría las inundaciones de las membranas mediante elementos protectores como barreras de protección o sistemas de contención, las torres, generalmente, se construyen sobre soportes, lo cual facilita el mantenimiento y la seguridad de la Planta, generando que esta no se vea afectada por inundaciones.

c) Riesgo de incendio forestal

Se muestra en la Figura 5.7, análoga a la Figura 5.6, la frecuencia de incendio forestal entre los años 2006 y 2015 para la zona del Proyecto

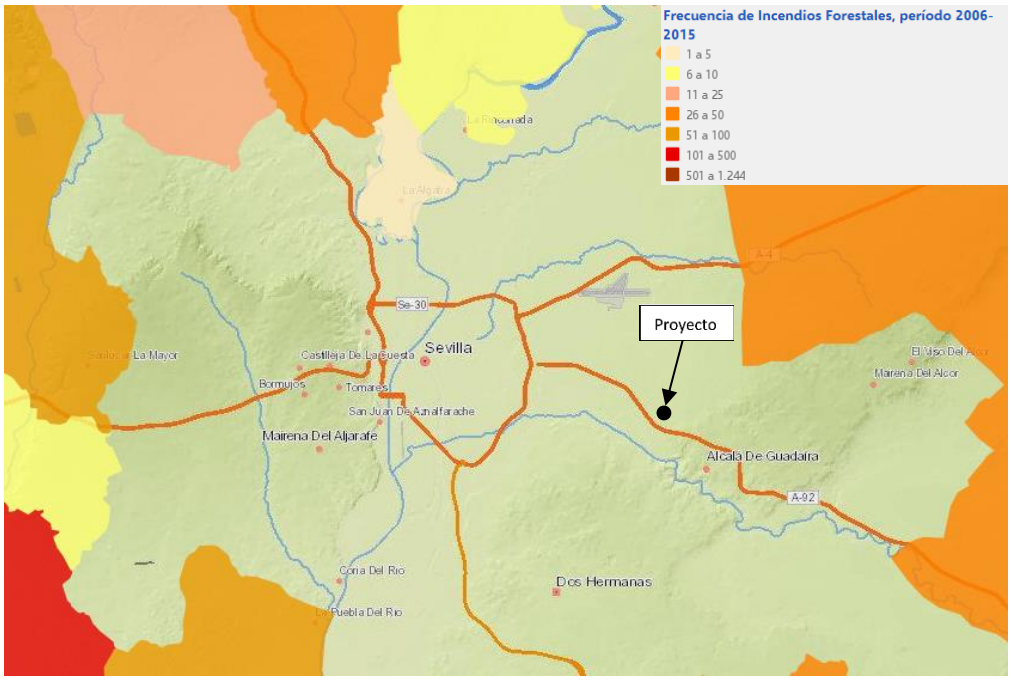

Figura 5.7: Frecuencia de incendio forestal [32]

Se observa que en las inmediaciones del Proyecto no se han registrado incendios forestales en el periodo estudiado, por lo que se concluye que las probabilidades de que suceda un incendio se consideran **poco probables**. Cabe recalcar que un incendio en las instalaciones del Proyecto conllevaría un grave perjuicio en las instalaciones debido a roturas en los equipos y posibilidad de explosión debido al incremento de temperatura en los gases que conforman el sistema de combustión, por lo que se considera que las consecuencias podrían llegar a ser **graves**.

En cuanto a la vulnerabilidad frente a incendios, si se observa una gran diferencia entre los Proyectos**, la tecnología de absorción con aminas es muy vulnerable frente a incendios exteriores**, debido a que las aminas se degradan a partir de 85 ºC, evitando el comportamiento normal del sistema y, por tanto, deshabilitando el sistema de captura de CO_2. En cuanto al sistema de captura por membranas, si bien estas también se ven afectadas por incendios, su comportamiento frente a temperaturas altas es ampliamente superior al comportamiento de las aminas, ya que las membranas aguantan temperaturas entre 550 y 600 ºC, lo cual permitiría un mayor tiempo de actuación para tomar medidas en la planta.

d) Sismicidad

Para establecer una evaluación de la intensidad sísmica se usa como base la Escala Macrosísmica Europea (EMS), esta indica el grado de afección de un sismo en una zona concreta. Dentro de dicha escala existen 12 subdivisiones, las cuales definen el nivel de consecuencias según su grado, tal y como se muestra en la Tabla 5.9. [33]

Tabla 5.9:

Grados de la Escala EMS-98

Grado	Descripción	Consecuencias del sismo
I	No sentido	No sentido, ni en las circunstancias más favorables
II	Apenas sentido	Vibración solo se percibe por algunas personas (1%) especialmente en reposo en los pisos superiores de edificios.
III	Débil	Vibración débil y percibida en interiores solo por pocas personas. Personas en reposo sienten balanceo o ligero temblor
IV	Ampliamente observado	Percibido en interiores por muchas personas, pero al aire lbre por muy pocas. Se despiertan algunas personas, el nivel de vibración no asusta, objetos colgados balancean
V	Fuerte	Percibido en interiores por la mayoría, al aire libre por unas pocas personas. Algunos escapan de los edificios, que tiemblan en su totalidad. Fuerte sacudida del mobiliario
VI	Levemente dañino	Sentido por la mayoría en los interiores y por muchos en los exteriores. En los edificios muchas personas se asustan y escapan. Objetos pequeños caen. Daños ligeros en edificios corrientes.
VII	Dañino	Mayoría de personas se asustan y escapan al exterior. Objetos caen de estanterías. Muchos edificios sufren daños moderados. Pequeñas grietas en las paredes y derrumbe parcial de chimeneas
VIII	Gravemente dañino	Puede volcar muebles. Muchos edificios corrientes sufren daños: chimeneas se derrumban. Algunos edificios pueden derrumbarse parcialmente
IX	Destructor	Monumentos y columnas caen o se tuercen. Muchos edificios corrientes se derrumban parcialmente, unos pocos completamente
X	Muy destructor	Muchos edificios corrientes se derrumban
XI	Devastador	La mayoría de los edificios corrientes se derrumban
XII	Completamente devastador	Prácticamente todas las estructuras por encima y por debajo del suelo quedan gravemente dañadas.

Tras la clasificación de los sismos, se muestra dicha clasificación en un mapa de España, en la que se situará el Proyecto, y, por tanto, quedará definida la intensidad de los terremotos en la zona. Dicha clasificación se muestra en la Figura 5.8. [34]

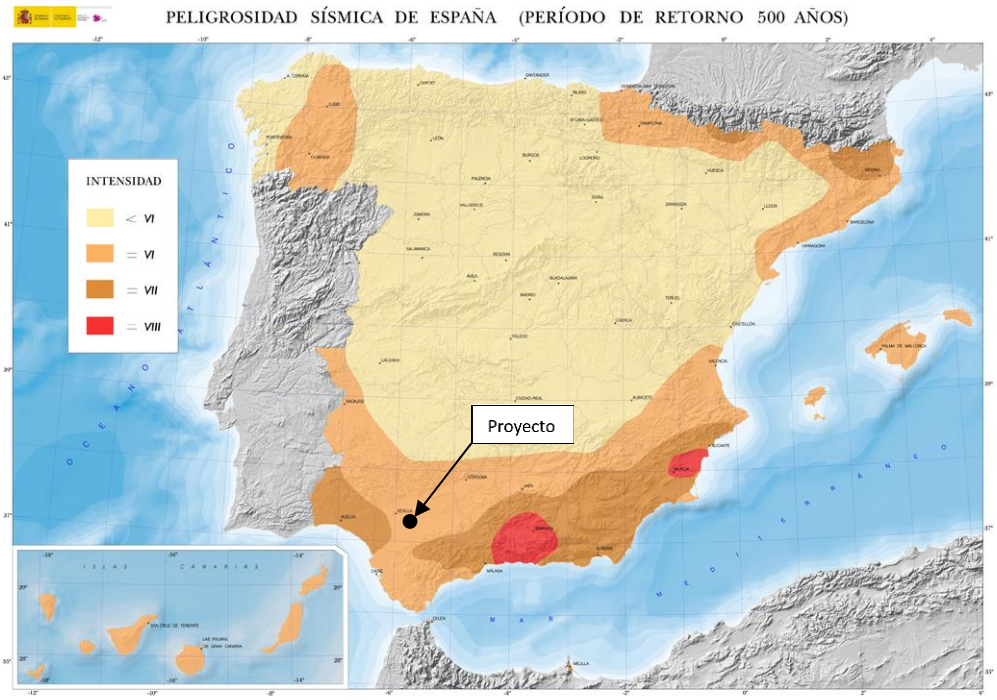

Figura 5.8: Mapa de peligrosidad sísmica

En base al mapa de peligrosidad sísmica, se puede sacar como conclusión que el seísmo podría desestabilizar algunos equipos, aunque en conjunto, las consecuencias que podrían tener un terremoto de estas magnitudes en el Proyecto se pueden considerar **menores**.

La frecuencia de terremotos en la zona puede ser visualizada en la Figura 5.9, del Instituto Geográfico Nacional, en la cual se muestran la frecuencia de terremotos en una zona concreta, así como su magnitud [34].

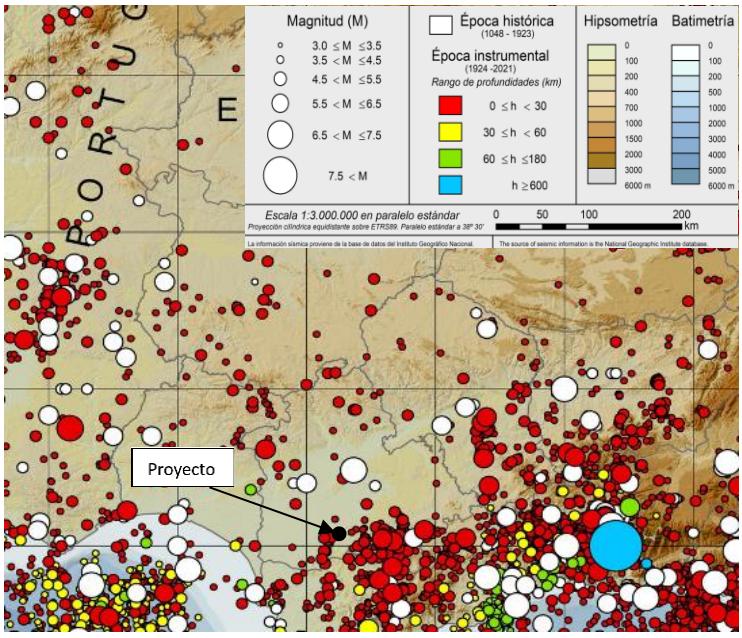

Figura 5.9: Peligrosidad sísmica de España

La frecuencia de terremotos en las inmediaciones del Proyecto se observa que es baja, y que los que sucedieron en la zona son de una baja intensidad, por lo que se concluye que la posibilidad de que ocurra un seísmo se considera **poco probable**

En cuanto a vulnerabilidad por seísmos, la Planta de captura por aminas es más vulnerable que la Planta de captura mediante membranas, esto debido a la altura de los edificios existentes en las Plantas, tal y como se explicó en el apartado de condiciones meteorológicas adversas, los edificios de mayor altura o montados sobre soportes resultan más vulnerable frente a aquellos al nivel del suelo, siendo especialmente el caso de las membranas, ya que el equipo es horizontal.

5.2.2 Valoración cuantitativa de los riesgos ante catástrofes naturales

En el presente apartado se procederá a realizar la valoración cuantitativa de cada una de las variables previamente citadas, para ello se otorgan los resultados en función de una tabla, teniendo en cuenta las puntuaciones indicadas en el capítulo 3.2.1 del documento. Para simplificar las tablas, se propone la siguiente terminología:

- **CMA:** Condiciones meteorológicas adversas
- **ID:** Inundabilidad
- **IE:** Incendio Exterior
- **SM:** Sismicidad

Los resultados se muestran en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10:

Riesgo para catástrofes naturales

Impacto	CMA	ID	IE	SM
Probabilidad	5	3	5	5
Consecuencia	3	0	9	4
Riesgo	15	0	45	20

Se muestra un recordatorio de las puntuaciones con el objetivo de mejorar el entendimiento de la tabla.

Probabilidad:	*3 Improbable*	*Consecuencia:*	*0 Despreciable*
	4 Muy poco probable		*3 Mínima*
	5 Poco probable		*4 Menor*
	7 Probable		*5 Significativa*
	9 Bastante probable		*7 Importante*
			9 Grave

Para la determinación de la capacidad de adaptación, habría que analizar si el Proyecto cumple con las variables existentes, ya que estas influyen de forma crucial en la vulnerabilidad del Proyecto. Dado que el Proyecto es ficticio, no se puede realizar un análisis tan profundo como debiera darse para asegurar que se cumplen con las variables, si bien para este caso se supondrá que el Proyecto cumple con todas las variables, se describe a continuación cada una de ellas y el contenido de las mismas:

- **Planificación gubernamental y empresarial**: La presente variable muestra si la planta y la comunidad autónoma tienen planes de autoprotección, así como planes de emergencia y otros sistemas de planificación, como pueden ser planes relativos a incendios forestales. Si bien se puede suponer que la planta posee un plan de autoprotección, no se puede determinar el contenido del mismo. En cuanto a los planes autonómicos, Andalucía dispone de un plan territorial de emergencias (PTEAnd) [35] que se elabora en pos de hacer frente a emergencias generales que se puedan generar en el territorio, la principal acción del plan de protección va dirigida a atender emergencias generales, coordinar y dirigir servicios, así como optimizar la prevención y prevención.

- **Variables económicas**: Cabe mencionar que Andalucía incorpora a sus presupuestos una partida para hacer frente a gastos derivados de emergencias en las que se haya requerido de la participación autonómica, asimismo se considerará que la Planta posee de un margen económico suficiente para hacer frente a posibles problemas de la instalación.

- **Infraestructuras**: Si bien esta variable comprende factores de diseño de equipos e infraestructuras generales, se supondrá que en la supuesta fase de construcción de la planta se han tomado las medidas necesarias para minimizar daños debido a factores externos, y por tanto, se considerará que se habrán tenido en cuenta sistemas de seguridad y prevención necesarios para la correcta seguridad del recinto.

- **Variables sociales**: Comprende tanto la formación de los trabajadores en materia de seguridad en caso de actuación en emergencias, así como campañas de información pública y realización de simulacros de emergencia.

Según lo mencionado, se tendrá en cuenta que el Proyecto cumple con las cuatro variables que conforman la capacidad de adaptación. Siendo por tanto en el cómputo de resultados un valor de 1 el que se aportará para el cálculo de la vulnerabilidad.

Posteriormente se mostrará la matriz de riesgos, la cual es una forma visual de comprender el riesgo que tienen cada una de las variables estudiadas en el presente apartado, si bien no es una medida directa de la vulnerabilidad, es una pieza clave a la hora del cálculo de la misma.

Se muestra la matriz de riesgos en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11:

Matriz de riesgo para catástrofes naturales

Índice de riesgo		**Consecuencia**						
		Despreciable	Mínima	Menor	Significativa	Importante	Grave	Muy grave
Probabilidad	Improbable	ID (0)						
	Muy poco probable							
	Poco probable		CMA (15)	SM (20)			IE (45)	
	Probable							
	Bastante probable							
	Muy probable							

Despreciable	R0:	0
Muy bajo	R1:	>0-20
Bajo	R2:	≤20-30
Medio	R3:	≤30-50
Alto	R4:	≤50-90
Muy alto	R5:	≥90-100

5.2.3 Evaluación de la vulnerabilidad del Proyecto ante catástrofes naturales

En el presente capítulo se muestran los resultados definitivos de la vulnerabilidad ante catástrofes naturales, tras conocer el riesgo y desarrollar la capacidad de adaptación de la planta, se aportará una conclusión ante los resultados obtenidos usando la metodología mencionada previamente

en el presente documento.

En base a los resultados obtenidos, se muestra en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12:

Resultados de la vulnerabilidad ante catástrofes naturales

Impacto	CMA	ID	IE	SM
Riesgo	R1	R0	R3	R2
Índice de riesgo	15	0	20	45
Capacidad de adaptación	1	1	1	1
Vulnerabilidad	15	0	20	45
Tipología de vulnerabilidad	V1 (Muy baja)	V1 (Muy baja)	V1 (Muy baja)	V1 (Muy baja)

Conociendo que la tipología de vulnerabilidad viene dada por:

V0: 0

V1: >0-100

V2: ≤100-200

V3: ≤200-300

V4: ≤300-500

V5: ≥500-700

Finalmente, se muestra la matriz de vulnerabilidad, por la que se muestran los resultados obtenidos. La Tabla 5.13 muestra la matriz previamente mencionada

Tabla 5.13:

Matriz de resultados de la vulnerabilidad ante catástrofes naturales

		Capacidad de adaptación				
		CA0	CA1	CA2	CA3	CA4
Riesgo	R0					ID (0)
	R1					CMA (15)
	R2					SM (20)
	R3					IE (45)
	R4					
	R5					

Despreciable
Muy baja
Baja
Media
Alta
Muy alta

Según los resultados anteriores, se observa que la **vulnerabilidad del Proyecto ante catástrofes naturales es muy baja**, lo que genera que no sea necesario tomar medidas preventivas o adaptativas.

5.3 Vulnerabilidad del Proyecto ante efectos derivados del cambio climático

En el presente apartado se busca analizar la vulnerabilidad del Proyecto ante los efectos derivados del cambio climático, realizando un análisis de las proyecciones de la temperatura y precipitaciones en la zona del Proyecto, usando datos de la AEMET, teniendo en cuenta tanto las situaciones más favorables como las más desfavorables, resumiendo los resultados obtenidos en matrices de impacto, tal y como se realizó en el apartado anterior del presente documento. Tras ello se comentará los posibles efectos ante los cambios mencionados, y se valorará la vulnerabilidad que el Proyecto tiene ante dichos cambios.

5.3.1 Identificación y valorización de los riesgos derivados por el cambio climático

Como se ha mencionado previamente, las variables de estudio del presente apartado son la evolución de los aspectos climatológicos asociados a la temperatura y los aspectos asociados a la precipitación, ambas variables son de suma importancia debido a que no solo afectan per sé a la población y a las condiciones laborales de los empleados, sino que suponen un riesgo en cuanto al abastecimiento de recursos al Proyecto, tales como la electricidad o las necesidades de agua requeridas en la operación. Dichos puntos serán desarrollados de manera más extensa en los siguientes apartados del documento.

Cabe recalcar que, en cuanto a la comparativa de vulnerabilidad entre Proyectos, para el caso de los efectos derivados del cambio climático, no se encuentran diferencias entre ellos, siendo por tanto **ambos Proyectos iguales en cuanto a vulnerabilidad debido a efectos derivados del cambio climático**, ya que estos cambios se basan en efectos en las lluvias y temperaturas, si adicionalmente, la evolución es progresiva en el tiempo, se puede considerar que los efectos serán idénticos para ambos Proyectos.

Las principales consecuencias del cambio climático son las alteraciones de las condiciones climáticas, las cuales se cuantifican mediante proyecciones desarrolladas por AEMET, en las que se desarrollan tres posibles escenarios, dependientes del forzamiento radioactivo, el cual se define como la diferencia entre la luz absorbida por la tierra y la irradiada de vuelta, en términos de flujo neto de calor [36].

RCP8.5: Forzamiento radioactivo de 8,5 W/m^2.

RCP6.0: Forzamiento radioactivo de 6,0 W/m^2.

RCP4.5: Forzamiento radioactivo de 4,5 W/m^2.

1) Variaciones de temperatura futuras

Para estudiar las variaciones de temperatura, se recurre a la herramienta de proyecciones de AEMET, en la cual se realizan estudios probabilísticos tomando en cuenta tres posibles situaciones, una optimista, neutra y pesimista, con el fin de conocer como las precipitaciones y temperaturas variarán según el curso de los años.

Las proyecciones de AEMET están realizados hasta el año 2100, si bien el hipotético Proyecto puede no tener una duración muy extensa, para la cuantificación de los efectos derivados del cambio climático, se tendrá en cuenta el escenario más restrictivo. Dicho lo anterior, cabe mencionar que el escenario más desfavorable se da para el RCP8.5, siendo este el forzamiento radioactivo más alto entre los tres estudiados.

Se muestra en la Figura 5.10 las proyecciones climatológicas correspondientes a la temperatura en la provincia de Sevilla [37].

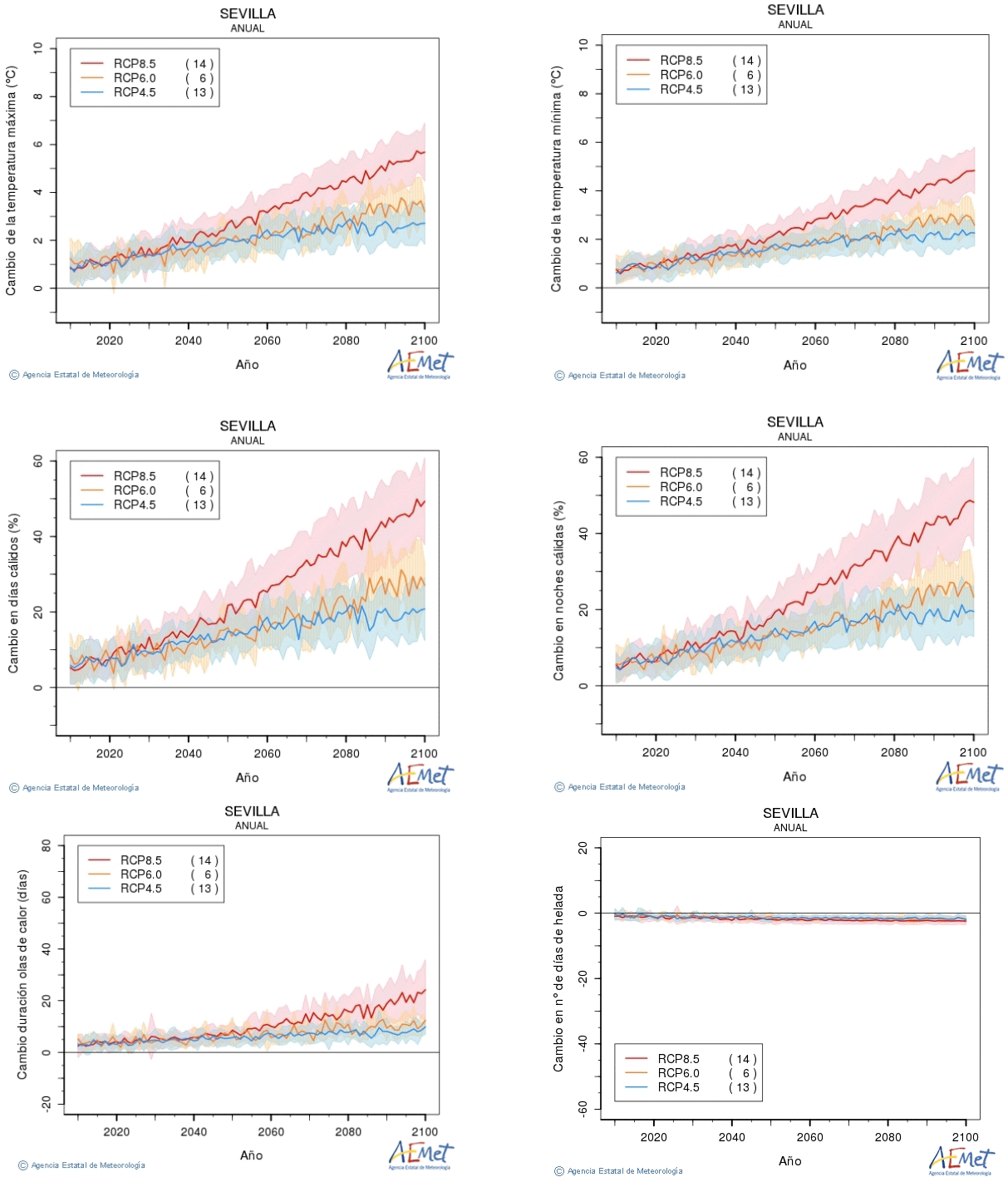

Figura 5.10: Proyecciones climatológicas relacionadas con la temperatura en Sevilla

De donde se puede sacar como conclusión:

- Para el año 2100, en el peor de los escenarios posibles, se experimentaría un aumento en la temperatura máxima y mínima entorno a los 4-5 ºC respecto a la temperatura actual

- Se proyecta un aumento en el número de días y noches cálidas cercano al 50%

- La duración de las olas de calor puede llegar a incrementarse hasta unos 23 días

- El número de días de helada no se ve afectado en gran medida en ninguno de los escenarios de estudio.

En cuanto a los posibles efectos derivados, se pueden destacar el hecho del aumento de temperaturas, el cual puede comprometer la operación de los equipos, aunque es necesario mencionar que el cambio se realizará de forma progresiva, siendo por tanto los efectos prácticamente despreciables en la operación normal de la planta, si bien es necesario contemplar la casuística de que la temperatura aumente hasta esos niveles.

Dicha variación en la temperatura puede generar efectos adversos en los aledaños de la planta, ya que, en condiciones de calor extremo, hay un incremento en la posibilidad de incendios, lo cual podría comprometer la integridad de la planta, aunque como se comentó en el apartado anterior, la planta se prevé que tenga capacidad de adaptación suficiente como para lidiar los efectos derivados de dicho incremento de temperatura.

Basado en los datos ofrecidos por AEMET, y el análisis realizado, se puede concluir que es **bastante probable** que se produzca el incremento de la temperatura citado anteriormente, y si bien las consecuencias serían **menores**, se debería considerar sus efectos en la operación y control de la planta, para no afectar al rendimiento de la misma.

2) Variaciones de precipitaciones futuras

De forma análoga al análisis realizado para los aspectos climatológicos relacionados con la temperatura, se realiza un análisis respecto a las precipitaciones futuras en la provincia de Sevilla, tal y como se refleja en la Figura 5.11. [37]

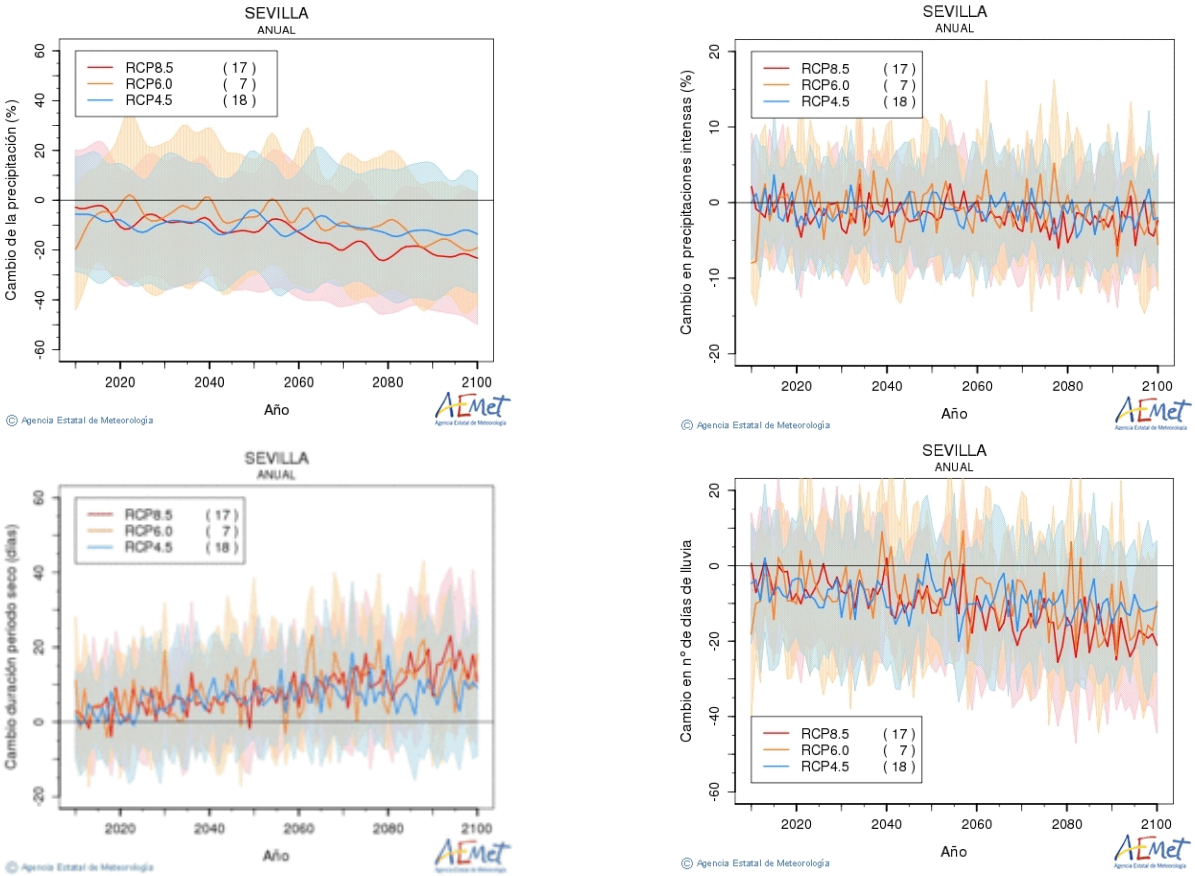

Figura 5.11: Proyecciones meteorológicas relacionadas con las precipitaciones en Sevilla

Las conclusiones obtenidas en base a los datos aportados por AEMET son:

- Teniendo en cuenta el peor escenario posible, se muestra que las precipitaciones pueden disminuir en torno al 20% respecto al valor actual.

- En cuanto a las precipitaciones intensas, estas fluctúan de manera irregular, aunque la tendencia de las mismas es a disminuir, siendo para el año 2100 y el RCP8.5 una disminución cercana al 5%

- La duración del periodo seco se ve incrementada aproximadamente en 10 días para las tres situaciones estudiadas

- El número de días de lluvia se ve fuertemente afectado, recibiendo una bajada que varía entre unos 15 y 20 días, según el escenario de estudio.

Según la Figura 5.11, se muestra de forma generalizada una disminución de las lluvias generalizadas, si bien estas no se muestran excesivamente importantes, sí que suponen una disminución de los recursos hídricos que, para el tipo de instalación proyectada, pueden suponer un perjuicio, ya que la operación de desorción se realiza con vapor de agua. La disminución de dichos recursos puede suponer un incremento en los costes de operación, ya que las utilities como el vapor de agua, o la propia electricidad de la planta pueden verse afectadas, ya que la energía eléctrica generada podría verse afectada negativamente por la disminución en la cantidad de agua. Si bien estos efectos se pueden prever de un impacto **menor**, cabe mencionar que es una situación **probable** de darse en el

medio-largo plazo.

En base a lo anterior, es necesario estudiar la disponibilidad de recursos de la instalación, ya que estos se ven directamente afectados por la variación de los aspectos climatológicos, y dado que principalmente la electricidad y agua son clave para la instalación, se considera que la instalación contará con recursos suficientes como para hacer frente a una subida de coste de la materia prima y que, por ello, tendrá una consecuencia **mínima** para el Proyecto, y será **poco probable** que la situación afecte de manera importante a la instalación.

5.3.2 Valoración cuantitativa del riesgo

En la Tabla 5.14 se recoge la información estudiada en los anteriores capítulos del documento, si bien cabe mencionar la nomenclatura utilizada para cada variable asociada a efectos ante el cambio climático:

- Variación de la temperatura (VT)
- Variación de las precipitaciones (VP)
- Disponibilidad de recursos en la instalación (DR)

Tabla 5.14:

Riesgo debido al cambio climático

Impacto	VT	VP	DR
Probabilidad	9	7	5
Consecuencia	4	4	3
Riesgo	36	28	15

Se muestra un recordatorio de las puntuaciones con el objetivo de mejorar el entendimiento de la tabla.

Probabilidad:	*3 Improbable*	*Consecuencia:*	*0 Despreciable*
	4 Muy poco probable		*3 Mínima*
	5 Poco probable		*4 Menor*
	7 Probable		*5 Significativa*
	9 Bastante probable		*7 Importante*
	10 Muy probable		*9 Grave*
			10 Muy grave

Se muestra en la Tabla 5.15 la matriz de riesgo asociada al cambio climático

Tabla 5.15:

Matriz de riesgo para efectos derivados del cambio climático

Índice de riesgo		**Consecuencia**						
		Despreciable	Mínima	Menor	Significativa	Importante	Grave	Muy grave
Probabilidad	Improbable							
	Muy poco probable							
	Poco probable		DR (15)					
	Probable			VP (28)				
	Bastante probable			VT (36)				
	Muy probable							

Despreciable	R0: 0
Muy bajo	R1: >0-20
Bajo	R2: ≤20-30
Medio	R3: ≤30-50
Alto	R4: ≤50-90
Muy alto	R5: ≥90-100

Como ya se realizó en el apartado anterior del documento, la capacidad de adaptación frente a los efectos derivados del cambio climático es igual a la descrita para las condiciones meteorológicas adversas. A modo de recordatorio se muestran las variables mencionadas:

- Planificación gubernamental y empresarial: De la misma forma, el plan de autoprotección de la propia planta contribuye a la lucha frente al cambio climático, si bien habría que añadir que, a nivel gubernamental, la Ley 7/2021 y el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) 2021-2030, conforman la planificación básica para promover la acción frente al cambio climático en España. A nivel autonómico, la Ley 8/2018 constituye entre otros, un instrumento de control a nivel autonómico.

- Variables económicas: En este caso se supondrá que el Proyecto posee márgenes económicos suficientes para hacer frente a los posibles efectos derivados del cambio climático.

- Infraestructuras: Para el Proyecto, se supondrá que las variaciones debidas al cambio climático no generarán una necesidad para la planta de construcción de infraestructura específica, así como que los equipos pertenecientes a la planta poseen la suficiente eficiencia y tecnología para disminuir las emisiones de contaminantes.

- Variables sociales: La instalación posee conocimiento suficiente de los riesgos derivados del cambio climático, así como del posible aumento de los costes de los recursos tales como el agua o la electricidad, así como el conocimiento de como ajustar los parámetros de funcionamiento de la planta en caso de alterarse las condiciones meteorológicas.

Según lo anterior, puede suponerse que la planta también posee las cuatro variables de la capacidad de adaptación, por lo que la vulnerabilidad del Proyecto será menor, dado que la obtención de dichas cuatro variables genera un factor multiplicador unidad a la hora de cuantificar la vulnerabilidad frente a los efectos derivados del cambio climático

5.3.3 Evaluación de la vulnerabilidad del Proyecto ante los efectos derivados del cambio climático

La finalidad del presente apartado consiste en la evaluación final de la vulnerabilidad del Proyecto ante los efectos derivados del cambio climático, teniendo el riesgo de cada tipo de variable asociada, así como la capacidad de adaptación de la planta ante dichas variables.

En la Tabla 5.16 se muestra el resultado final de la vulnerabilidad tras conocer el riesgo y la capacidad de adaptación de la planta

Tabla 5.16:

Resultados de la vulnerabilidad ante los efectos derivados del cambio climático

Impacto	VT	VP	DR
Riesgo	R3	R2	R1
Índice de riesgo	36	28	15
Capacidad de adaptación	1	1	1
Vulnerabilidad	36	28	15
Tipología de vulnerabilidad	V1 (Muy baja)	V1 (Muy baja)	V1 (Muy baja)

Conociendo que la tipología de vulnerabilidad viene dada por:

V0: 0

V1: >0-100

V2: ≤100-200

V3: ≤200-300

V4: ≤300-500

V5: ≥500-700

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.17, la cual se corresponde con la matriz de vulnerabilidad del Proyecto frente a los efectos derivados del cambio climático.

Tabla 5.17:

Matriz de resultados de la vulnerabilidad ante los efectos derivados del cambio climático

		Capacidad de adaptación				
		CA0	CA1	CA2	CA3	CA4
Riesgo	R0					
	R1					DR (15)
	R2					VP (28)
	R3					VT (36)
	R4					
	R5					

Despreciable
Muy baja
Baja
Media
Alta
Muy alta

En vista de los resultados obtenidos, se concluye que la vulnerabilidad del Proyecto de captura de CO_2 mediante tecnología de absorción con aminas frente a los efectos derivados del cambio climático es muy baja, por lo que no será necesario tomar medidas preventivas o adaptativas.

5.4 Vulnerabilidad global del Proyecto

A efectos de resumen, se aporta la Tabla 5.18, que muestra los riesgos y vulnerabilidades frente a cada una de las variables implicadas en el estudio

Tabla 5.18:

Resumen de la vulnerabilidad del Proyecto

Tipología de suceso		Abreviatura	Tipología de riesgo	Tipología de vulnerabilidad	Actuaciones
Catástrofes naturales	Condiciones meteorológicas adversas	CMA	R1-Muy bajo	V1-Muy baja	No es necesario tomar acciones preventivas o adaptativas
	Inundaciones	IN	R0-Despreciable	V1-Muy baja	
	Incendio Exterior	IE	R3-Medio	V1-Muy baja	
	Sismicidad	SM	R2-Bajo	V1-Muy baja	
Efectos ambientales derivados del cambio climático	Variación de temperatura	VT	R3-Medio	V1-Muy baja	No es necesario tomar acciones preventivas o adaptativas
	Variación de precipitaciones	VP	R2-Bajo	V1-Muy baja	
	Disponibilidad de recursos	DR	R1-Muy bajo	V1-Muy baja	

A continuación, se muestra la Tabla 5.19, la cual muestra la matriz global de vulnerabilidad del Proyecto.

Tabla 5.19:

Matriz global de la vulnerabilidad del Proyecto

Vulnerabilidad		Capacidad de adaptación				
		CA0 Despreciable	CA1 Mínima	CA2 Media	CA3 Significativa	CA4 Importante
Riesgo	R0 Despreciable					IN
	R1 Muy bajo					CMA, DR
	R2 Bajo					SM, VP
	R3 Medio					IE, VT
	R4 Alto					
	R5 Muy alto					

En base a los resultados anteriores, se puede concluir que **la vulnerabilidad ambiental del Proyecto de una planta de captura de CO_2 con tecnología de absorción con aminas en una parcela anexa a la cementera Portland de Alcalá de Guadaira frente a catástrofes naturales y los efectos derivados del cambio climático es muy baja**, por lo que no será necesario tomar medidas preventivas o adaptativas.

Si bien la vulnerabilidad de ambos Proyectos de captura de CO_2 resulta ser muy baja, cabe destacar la menor vulnerabilidad de la captura mediante membranas, ya que los factores constructivos de la instalación resultan ser más beneficiosos frente a la captura con aminas, ya que la escasa altura de los equipos perteneciente a la captura por membranas genera que la consecuencia de los actos en caso de darse las condiciones meteorológicas adversas son mucho menores.

En base a lo anterior, se puede concluir que, **si bien ambos Proyectos no son muy vulnerables a los efectos derivados del cambio climático y las condiciones meteorológicas adversas, si existe una diferencia notable entre Proyectos de captura de CO_2 con tecnología de absorción con aminas y mediante membranas, siendo menor la vulnerabilidad del Proyecto con membranas debido a los factores constructivos de la instalación.**

6 CONCLUSIONES

La captura de CO_2 es un proceso clave en la búsqueda de la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero y mediante las tablas y gráficas aportadas en el documento se demuestra la gran variedad de técnicas disponibles existen actualmente para realizar dicho proceso. Para seleccionar dos tecnologías a comparar se realiza un análisis de alternativas, el cual ayuda a eliminar aquellas alternativas que sean menos beneficiosa para el Proyecto según los criterios que se estudien.

Tras la realización del análisis de alternativas de las tecnologías de captura en postcombustión se observa que hay dos tecnologías predominantes, una tecnología tan conocida y estudiada como la absorción química mediante aminas, y una tecnología novedosa con un futuro prometedor, la tecnología de captura mediante membranas

La implantación de un Proyecto de captura de CO_2 requiere de evaluación ambiental, y debido a esto, se usan ambas tecnologías para realizar un estudio de vulnerabilidad del Proyecto, con el objeto no solo de desarrollar uno de los capítulos del Estudio de Impacto Ambiental, sino de lograr diferenciar lo vulnerable que sería una hipotética planta, situada en la misma ubicación, pero aplicando cada una de las tecnologías seleccionadas en el análisis de alternativas.

El trámite ambiental requiere de la observación meticulosa de la legislación de aplicación, principalmente de la Ley 21/2013 de evaluación ambiental, el Real Decreto Legislativo 1/2016 por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación y el Real Decreto 815/2013 por el que se aprueba el reglamento de emisiones industriales.

El estudio de vulnerabilidad desarrollado muestra que ninguno de los dos Proyectos desarrollados en una parcela anexa a la cementera Portland Valderrivas de Alcalá de Guadaira son vulnerables a los efectos estudiados, estos efectos son los efectos derivados del cambio climático y las catástrofes naturales. Los datos obtenidos fueron proporcionados por AEMET y los visores del Geoportal del ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, una vez obtenidos los datos y estudiados conforme a la metodología establecida por el documento base de vulnerabilidad (Caso Piloto Ferrovial, 2014), se observa que el riesgo ante los criterios estudiados es bajo, lo cual añadido a la gran capacidad de adaptación de la Planta, criterios estudiados en el documento, muestra que finalmente la vulnerabilidad de ambos Proyectos es baja.

Si bien ambos Proyectos aportan datos muy favorables en cuanto a su vulnerabilidad, cabe destacar que la vulnerabilidad no es igual entre los Proyectos, debido a factores constructivos y operacionales, los cuales, una vez estudiados, muestran que una Planta de captura con tecnología de absorción con aminas es más vulnerable que la Planta de membranas, principalmente debido al riesgo ante terremotos y vientos que sufren las estructuras esbeltas, ya que los bancos de membranas son horizontales y de alturas bajas, estas no sufren en gran medida ante dichas situaciones. Adicionalmente, es clave mencionar un factor determinante a la hora de estudiar la vulnerabilidad entre los Proyectos, el comportamiento ante fuego exterior, no solo por la posible afección a la estructura en la que se produzca el proceso de separación, sino a los efectos que estas altas temperaturas pueden generar en los elementos que logran la separación del CO_2 de la corriente, ya que las aminas se degradan a partir de los 85 ºC, mientras que las membranas soportan temperaturas entre los 550 y 600 ºC, lo cual aporta una gran ventaja y capacidad de adaptación a la problemática, ya que permite un mayor tiempo de

actuación antes de que el proceso de captura con membranas se vea afectado.

En base a lo anterior, y al estudio generado en el documento, se concluye que ambas tecnologías tienen una gran aplicabilidad en el sector, si bien las membranas aún están en proceso de desarrollo, y mencionar que son procesos poco vulnerables de aplicar a nivel industrial, mayoritariamente debido a la gran capacidad de adaptación de las Plantas, con lo que tras realizar el estudio de vulnerabilidad, se puede afirmar que los Proyectos no son vulnerables ante efectos derivados del cambio climático ni ante catástrofes naturales, por lo que no es necesario tomar medidas preventivas o adaptativas para ninguna de las Plantas proyectadas.

7. REFERENCIAS

[1] Evolución de la temperatura de la superficie de la tierra respecto a nivel pre-industrial. (2023). *Https://Www.Epdata.Es/Datos/Cambio-Climatico-Datos-Graficos/447*.

[2] *Estrategia de Descarbonización 2050. (2020). Https://Www.Idae.Es/Noticias/El-Gobierno-Aprueba-La-Estrategia-de-Descarbonizacion-Largo-Plazo-Que-Marca-La-Senda-Para.*

[3] *Consejo de la Unión Europea. (2020). Objetivo 55. Https://Www.Consilium.Europa.Eu/Es/Policies/Green-Deal/Fit-for-55/#package*

[4] Ana Caballero. (2024). *Tipos de Captura de CO2*. Https://Climate.Selectra.Com/Es/Huella-Carbono/Captura.

[5] Luis, A., & Fuentes, L. (n.d.). *Capítulo 2_230410.* https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/20214/fichero/3-Cap%C3%ADtulo+2%252FCap%C3%ADtulo+2.pdf

[6] Juan Carlos Abanades, & Pedro Casero. (2015). *Captura de CO2 a gran escala*. Https://Www.Researchgate.Net/Figure/Figura-21-Sistema-de-Captura-de-CO2-Post-Combustion-En-Una-Central-Termica-De_fig5_272496993.

[7] Blanco, E. A., & Ortega, F. M. (n.d.). *Chemical plant at dusk with lights and smoke*. https://www.cdtdegas.com/images/Descargas/Nuestra_revista/MetFlu14/7_CapturaCO2.pdf

[8] *3. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA DE CO 2. (n.d.). Retrieved October 3, 2024, from https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4355/fichero/ANALISIS+DE+LA+TECNOLOGIA+DE+REDUCCION+EFECTIVA+DE+EMISIONES+DE%252F3.+TECNOLOGIA+DE+CAPTURA+DE+CO2.pdf*

[9] Cruz-Navarro, D. S., Torres-Rodríguez, M., Mugica-Álvarez, V., & Gutiérrez-Arzaluz, M. (2018). *Separation and Capture of CO2 through A Zeolitic Membrane.* 1436. https://doi.org/10.3390/proceedings2231436

[10] Spigarelli, B. P., & Kawatra, S. K. (2013). Opportunities and challenges in carbon dioxide capture. In *Journal of CO2 Utilization* (Vol. 1, pp. 69–87). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2013.03.002

[11] *2. PROCESOS DE SEPARACION POR MEMBRANAS 2.1 ANTECEDENTES Y DEFINICIONES.* (n.d.). https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6233/03_Mem%C3%B2ria.pdf?sequence=4&isAllowed=y

[12] Pobre, A., Absorbedor, D., & de Combustión Co, G. (n.d.). *Bol. Grupo Español Carbón.* https://www.gecarbon.org/boletines/articulos/BoletinGEC_035_art2.pdf

[13] *Tixi, H., Barahona, ;, Natalia, Garmendia, ;, Henry, Ramírez, ;, & John. (2019). Simulación del proceso de endulzamiento de gas natural usando la solución acuosa de monoetanolamina Simulation of the natural gas of sweetening process by aqueous solution of monoethanolamine. In Revista Ciencia e Ingeniería (Vol. 40, Issue 1).*

[14] *VenturaOrts. (2019). Scrubber Horizontal. https://venturaorts.com/scrubber-horizontal/*

[15] *YARA. (n.d.). Reactores Catalíticos Selectivos (SCR). Retrieved October 13, 2024, from https://www.yara.es/productos-quimicos-nitrogenados-y-soluciones-medioambientales/reduccion-nox-para-plantas-industriales/sistemas-scr-sncr-o-sncrscr-hibridos/tecnologia-scr/*

[16] *SUGIMAT. (n.d.). Principio de funcionamiento de electrofiltros. Retrieved October 13, 2024, from https://www.sugimat.com/productos/sistemas-de-depuracion-de-calderas/*

[17] *2. PROCESOS DE SEPARACION POR MEMBRANAS 2.1 ANTECEDENTES Y DEFINICIONES. (n.d.). Retrieved September 28, 2024, from https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6233/03_Mem%C3%B2ria.pdf?sequence=4*

[18] *Merck. (2024). Catálogo de filtros y membranas. https://www.sigmaaldrich.com/ES/es/products/filtration/laboratory-filter-membranes/filter-membranes?srsltid=AfmBOorh7oF22DvaS5jl6zPOKjgnHGx8NgrYPcoW3mBPIB3x1fwuP0mu&country=ES&language=es&cmsRoute=products&cmsRoute=filtration&cmsRoute=laboratory-filter-membranes&cmsRoute=filter-membranes&page=1&searched=co2&facets=facet_product_category%3Amembranes*

[19] *Sierra, E. T. (n.d.). NTP 379: Productos inflamables: variación de los parámetros de peligrosidad. Retrieved September 28, 2024, from https://www.insst.es/documents/94886/326853/ntp_379.pdf/a8bbcd8a-a6c1-4dca-b452-f32213e25752?version=1.2&t=1688062311152*

[20] *Muñoz Aguado, M. J., & Gregorkiewitz, M. (n.d.). Membranas de sílice. Retrieved September 29, 2024, from https://patentimages.storage.googleapis.com/6e/50/22/d0305dfa739ba7/WO1994008706A1.pdf*

[21] *MITECO. (2020). Sectores con mayor generación de CO2. https://www.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/transicion-ecologica/Paginas/2021/010721-emisiones_co2.aspx*

[22] Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. (n.d.). *Emisiones Cementera Portland Valderrivas Alcalá de Guadaira*. Retrieved September 30, 2024, from https://prtr-es.es/informes/fichacomplejo.aspx?Id_Complejo=1579

[23] *Estudio de Impacto Ambiental*. (2022, May 7). Https://Administrativando.Es/El-Estudio-de-Impacto-Ambiental/.

[24] Vi, F., & de España, R. (n.d.). *TEXTO CONSOLIDADO Última modificación: sin modificaciones*. https://www.boe.es/buscar/pdf/2013/BOE-A-2013-12913-consolidado.pdf

[25] Vi, F., & de España, R. (n.d.). *TEXTO CONSOLIDADO Última modificación: sin modificaciones*. https://www.boe.es/buscar/pdf/2018/BOE-A-2018-16674-consolidado.pdf

[26] *Boletín Oficial del Estado. (n.d.). RD 815 2013. Retrieved October 1, 2024, from https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2013-10949&p=20230125&tn=1*

[27] ENVISIO AESC, & INERCO. (2022). *Estudio de impacto ambiental. Proyecto Planta de Baterias de Iones de Litio en Navalmoral de la Mata (Cáceres)*. http://extremambiente.juntaex.es/files/EIA_ENVISION_firmado(1).pdf

[28] Solaun, K., Gómez, I., Urban, J., Carlos Gómez, J., & CMAE - Factor, F. C. (n.d.). *Integración de la adaptación al cambio climático en la estrategia empresarial. Guía metodológica para el análisis y priorización de medidas de adaptación al cambio climático. Caso piloto: Grupo Ferrovial ; NIPO: 280-16-318-8 (línea)*. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/publicaciones/publicaciones/adaptacionempresarialcambioclimatico-ferrovial_tcm30-178441.pdf

[29] Junta de Extremadura. (2022, November 2). *Trámite de información público* . Https://Www.Juntaex.Es/w/Autorizacion-Ambiental-Para-El-Proyecto-de-La-Gigafactoria-En-Navalmoral?InheritRedirect=true.

[30] Versión. (n.d.). *Umbrales y niveles de aviso.* https://www.aemet.es/documentos/es/eltiempo/prediccion/avisos/plan_meteoalerta/METEOALERTA_ANX1_Umbrales_y_niveles_de_aviso.pdf

[31] AEMET. (n.d.). *OpenData* . Https://Opendata.Aemet.Es/Centrodedescargas/ProductosAEMET?

[32] Ministerio de Agricultura, P. y A. (n.d.). *Visor GeoPortal*. Https://Sig.Mapama.Gob.Es/Geoportal/Geoportal.Html.

[33] *Tabla de vulnerabilidad Tipo de estructura Clase de vulnerabilidad. (n.d.). https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/SIS-Escala-Intensidad-Macrosismica.pdf*

[34] Instituto Geográfico Nacional. (n.d.). *Mapa de peligrosidad sísmica*. Https://Www.Ign.Es/Web/Mapas-Sismicidad.

[35] Junta de Andalucía. (n.d.). *Plan Territorial de Emergencia de Protección Civil de Andalucía (PTEAnd)*. https://www.juntadeandalucia.es/organismos/presidenciainteriordialogosocialysimplificacionadministrativa/areas/interior/emergencias-112/planes/paginas/pteand-planes-emergencia.html

[36] Pdf, P. A. (n.d.). *Cambio Climático: Bases Físicas GUÍA RESUMIDA DEL QUINTO INFORME DE EVALUACIÓN DEL IPCC GRUPO DE TRABAJO I Con la colaboración de*. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/ceneam/recursos/mini-portales-tematicos/guia-resumida-grupo-trabajoi_tcm30-376939.pdf

[37] AEMET. (n.d.). *Proyecciones Meteorológicas para el año 2100*. Https://Www.Aemet.Es/Es/Serviciosclimaticos/Cambio_climat/Result_graficos?W=0&opc1=41&opc2=Tx&opc3=Anual&opc4=0&opc6=0.