

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería Química

Captura de CO₂ en la elaboración de refrescos.
Evaluación de su aplicación en una planta industrial.

Autor: Julio Garduño Puerto

Tutores: Esmeralda Portillo Estévez

Luz Marina Gallego Fernández

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

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Química

**Captura de CO₂ en la elaboración de refrescos.
Evaluación de su aplicación en una planta
industrial.**

Autor:

Julio Garduño Puerto

Tutor:

Esmeralda Portillo Estévez

Luz Marina Gallego Fernández

Dpto. de Ingeniería Química Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Grado: Captura de CO₂ en la elaboración de refrescos. Evaluación de su aplicación en una planta industrial.

Autor: Julio Garduño Puerto

Tutoras: Esmeralda Portillo Estévez
Luz Marina Gallego Fernández

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Este trabajo junto con el resto de las asignaturas es dirigido a mis padres como principales apoyos en los años que llevo en la Escuela de Ingenieros.

Mamá gracias por apoyarme día a día ya salieran las cosas bien o mal, has estado ahí desde el minuto uno que empecé en estos estudios, gracias por tu sacrificio como madre en todos los ámbitos. Y a ti Papá, desde que empezamos los dos en los estudios siempre has sido mi entrenador, mi profesor, mi guía en los estudios, pero sobre todo referente como padre, por ello gracias, ahora toca otra etapa que seguro que será diferente pero igual de ambiciosa. Gracias a mis tutoras, sin ninguna duda dos personas maravillosas que transmiten esa cercanía y complicidad como ningún otro profesor lo ha hecho.

Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se detallan cada uno de los sistemas de captura de CO₂, y se evalúa la implantación de tecnologías de membrana para la captura del CO₂ emitido en una instalación de elaboración de refrescos. Para ello, se hace uso del software Engineering Equation Solver (EES) con el objetivo de evaluar la reducción del dióxido de carbono emitido por la instalación y analizar la posible recuperación del CO₂ capturado planteando su recirculación y/o almacenamiento para su uso posterior o venta. En este sentido, se plantea una comparativa de dos modelos de captura con membranas: el primero de ellos de mezcla perfecta, donde se asume que las concentraciones de las corrientes de rechazo (R) y permeado (P) son las mismas; el segundo, de flujo cruzado, siendo este una combinación del modelo de flujo pistón, donde los flujos y concentraciones varían en función del punto considerado de la membrana, junto con el de mezcla perfecta.

Este estudio se desarrolla en la zona calderas, donde a partir de los datos de emisión facilitados por la instalación, y los resultados obtenidos del programa EES, se selecciona el modelo más adecuado atendiendo al porcentaje de CO₂ en la corriente de rechazo. . A continuación, se realiza una estimación económica para evaluar el coste asociado a la instalación de la tecnología de membrana seleccionada. Por otro lado, a partir del precio de venta de la tonelada de CO₂, y de la cantidad de CO₂ emitido, se realiza una estimación del beneficio que podría alcanzar la empresa por instalar el sistema de captura basado en membranas selectivas.

Abstract

In this Final Degree Project, each of the CO₂ capture systems is detailed, and the implementation of membrane technologies for the capture of CO₂ emitted in a soft drink production facility is evaluated. To do this, the Engineering Equation Solver (EES) software is used with the objective of evaluating the reduction of carbon dioxide emitted by the facility and analyzing the possible recovery of the captured CO₂, considering its recirculation and/or storage for subsequent use or sale. . In this sense, a comparison of two capture models with membranes is proposed: the first of them of perfect mixing, where it is assumed that the concentrations of the rejection currents (R) and permeate (P) are the same; the second, cross flow, this being a combination of the plug flow model, where the flows and concentrations vary depending on the considered point of the membrane, together with that of perfect mixing.

This study is carried out in the boiler area, where based on the emission data provided by the installation, and the results obtained from the EES program, the most appropriate model is selected based on the percentage of CO₂ in the rejection stream. Next, an economic estimate is made to evaluate the cost associated with the installation of the selected membrane technology. On the other hand, based on the sales price of a ton of CO₂, and the amount of CO₂ emitted, an estimate is made of the benefit that the company could achieve by installing the capture system based on selective membranes.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	x
Abstract	xi
Índice	xii
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras	xv
1. Introducción	
1.1. Marco teórico	
1.1.1. Problemática del CO ₂	
1.1.2. Sectores afectados. Sector del refresco	
1.1.3. Sistemas de captura de CO ₂ . Captura postcombustión	
1.2. El Sector de los refrescos	
1.3. Objetivos	
1.4. Alcance	
2. Metodología	
2.1. Análisis y recopilación de la información	
2.2. Definición de la configuración del sistema de captura	
2.3. Comparativa de modelos	
2.3.1. Evaluación de modelo de Mezcla Perfecta	
2.3.2. Evaluación de modelo de Flujo Cruzado	
2.4. Evaluación fase de compresión	
2.5. Evaluación estimación económica	
3. Resultados y discusión	
4. Conclusiones	
5. Bibliografía	
6. Anexo	

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1. Características de los sistemas de captura de CO₂
- Tabla 2. Materiales empleados para la conformación de membranas poliméricas
- Tabla 3. Tipos de módulos de membranas. Ventajas e inconvenientes asociados
- Tabla 4. Datos de estudio
- Tabla 5. Correlaciones tomadas para realizar el análisis económico
- Tabla 6. Composiciones de CO₂ para una membrana de 150 m²
- Tabla 7. Resultados obtenidos durante el estudio
- Tabla 8. Datos del estudio estimación económica
- Tabla 9. Resultados de costes totales

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfica de Temperatura-Irradiación frente a años	1
Figura 2. Efecto invernadero	
Figura 3. Porcentajes de GEI	
Figura 4. Emisiones de CO ₂ por combustible o tipo de industria	
Figura 5. Emisiones por sector	
Figura 6. Proceso de carbonatación	
Figura 7. Captura de CO ₂ en Mtpa a nivel mundial	
Figura 8. Sistemas de captura de CO ₂	
Figura 9. Diagrama de bloques sistema postcombustión	
Figura 10. Diagrama de bloques absorción química	
Figura 11. Diagrama de flujo con MEA como reactivo	
Figura 12. Diagrama de flujo de un proceso simplificado de Selexol	
Figura 13. Diagrama de Flujo de un Proceso Típico PSA	
Figura 14. Esquema general de separación de membranas	
Figura 15. Diagrama de flujo simplificado de captura de CO ₂	
Figura 16. Módulo de haz en espiral	
Figura 17. Módulo de fibra hueca	
Figura 18. Modelo solución-difusión	
Figura 19. Diagrama de Flujo del Proceso de Captura de CO ₂ por Separación Criogénica	
Figura 20. Diagramas de la evolución del precio en diferentes sectores debido a la guerra	
Figura 21. Evolución del precio de CO ₂	
Figura 22. Plano de la planta de la empresa A	
Figura 23. Ubicación de la caldera a estudio	
Figura 24. Diagrama de flujo carbonatación	
Figura 25. Evolución histórica de las emisiones de CO ₂ (kg/año)	
Figura 26. Emisiones de compuestos en kg/año	
Figura 27. Configuración de sistema de captura de CO ₂ propuesto para su implantación en fábrica	
Figura 28. Módulo mezcla perfecta	
Figura 29. Modelo flujo cruzado	
Figura 30. Medidor y ajuste de presión inicial de CO ₂	
Figura 31. Características de caldera	
Figura 32. Depósitos de CO ₂ junto con intercambiadores	
Figura 33. Análisis concentraciones en Mezcla Perfecta	
Figura 34. Análisis concentraciones en Flujo Cruzado	

Figura 35. Valores de permeancia de CO₂

Figura 36. Valores de concentración en el rechazo de CO₂ frente área de membrana en MP

Figura 37. Valores de concentración en el rechazo de CO₂ frente área de membrana en FC

Figura 38. Venta de gas permeado con respecto a meses

Figura 39. Análisis del beneficio estimado para la instalación por implantación del sistema de CO₂ propuesto

Figura 40. Tendencia de emisiones CO₂ tras la instalación de membrana

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Marco teórico

En la actualidad uno de los temas que preocupa al mundo científico es el calentamiento global, el cual se empezó a notar desde mediados del siglo XX.(Ministerio de Agricultura, n.d.)

Existen estudios que indican que los cambios en la variabilidad de la energía del Sol, cambio climático, se refiere a la variación del clima global de la Tierra. A lo largo del tiempo, el clima global de la Tierra ha cambiado de forma natural, pero estos no pueden tener únicamente orígenes naturales. La NASA, la World Meteorological Organization o la United Nations Environment Programme, se tratan de organizaciones que sostienen que una parte importante de los factores que están propiciando este cambio, se debe al papel que ocupa la actividad humana, entre las cuales cabe destacar principalmente aquellas actividades relacionadas con la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y sus derivados y el gas natural), lo que supone el aumento progresivo de la temperatura.(Shaftel Holly & Callery Susan Randal, et al., n.d.)

En la Figura 1, se observa lo mencionado anteriormente, es decir, hay un incremento del valor de la temperatura debido al número indeterminado de emisiones del sector industrial, lo que apunta a que si no hay un control de ello será inviable regresar a un punto equilibrado. En dicha figura aparecen líneas más delgadas que reflejan los niveles anuales de irradiación y temperatura, y líneas gruesas que representan la tendencia a lo largo de los años. (Shaftel Holly et al., n.d.) Se determina que la energía solar ha seguido un ciclo natural y la irradiación se ha mantenido prácticamente constante, por lo que hace pensar que la producción industrial, como la quema de combustibles fósiles (utilizados para el transporte de mercancía y viajeros, en la generación de energía eléctrica, procesos industriales), en procesos industriales (caso de los CFC (clorofluorocarburos), por ejemplo) y en el sector primario (caso del metano, producido principalmente en el cultivo de arroz y también en la descomposición de residuos en vertederos) es la principal problemática del cambio climático.

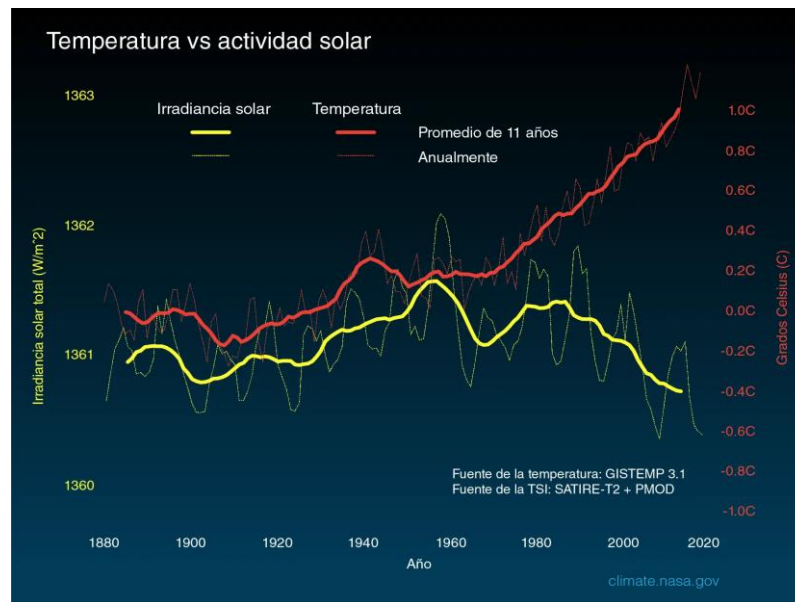


Figura 1. Gráfica de Temperatura-Irradiación frente a años (Shaftel Holly & Callery Susan Randal et al., n.d.)

1.1.1. Problemática del CO₂

Las actividades industriales de nuestra sociedad actual han causado una enorme cantidad de emisiones de gran variedad de gases. Estas son la causa del efecto invernadero, es decir, la Tierra recibe radiación procedente del Sol, parte de la cual se absorbe, y otra parte se refleja hacía otros puntos del espacio exterior. Así mismo el planeta, como se ha comentado, irradia energía, cediéndola hacia cuerpos más fríos. Los gases de efecto invernadero (GEI) permiten que la Tierra absorba calor procedente del Sol, pero, estos gases dificultan que la Tierra irradie energía hacia el espacio. Parte de la energía que emite la superficie de la Tierra, se refleja en estos gases, devolviéndola a la Tierra de nuevo, provocando así un aumento de la temperatura (Alberto Valdivielso, n.d.)

Como queda reflejado en la Figura 2 (Shaftel Holly & Callery Susan Randal et al., n.d.), la luz del sol atraviesa la atmósfera y calienta la superficie de la tierra. Este calor se irradia hacia el espacio y la mayor parte del calor saliente es absorbido por las moléculas de gases de efecto invernadero y reemitido en todas las direcciones, calentando la superficie de la tierra y la atmósfera inferior.

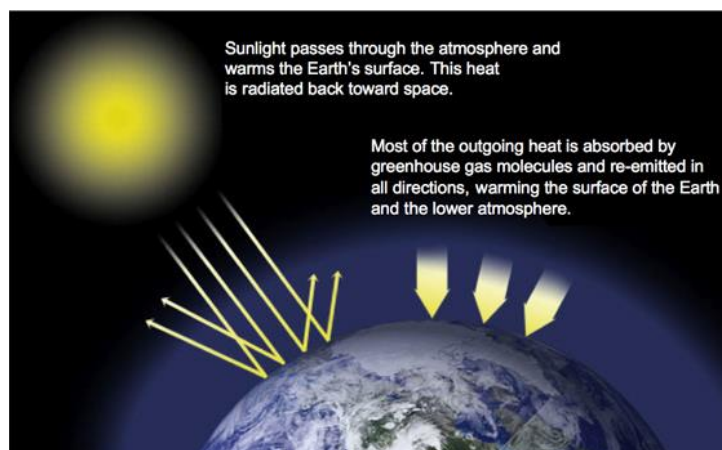


Figura 2. Efecto invernadero (Anna Sheffer, n.d.)

Los GEI están compuestos por el vapor de agua, el óxido nitroso, el metano y el ozono. Además, hay una serie de gases generados por el hombre que son los llamados halocarbonos. En la siguiente Figura 3 queda reflejado cada uno de los porcentajes que se encuentran estos gases, siendo el dióxido de carbono (CO_2) el compuesto que más abunda. Cabe decir que es el más importante, y no porque sea el gas más dañino a iguales concentraciones en la atmósfera, sino porque su concentración en el aire es mucho mayor que la del resto de compuestos (roza las 400 ppm). Por este motivo, la mayoría de las iniciativas para frenar el cambio climático están enfocadas en la reducción de las emisiones de este gas, las cuales superan los 30 mil millones de toneladas al año. (EPA Unites States Environmental Protection Agency, n.d.)

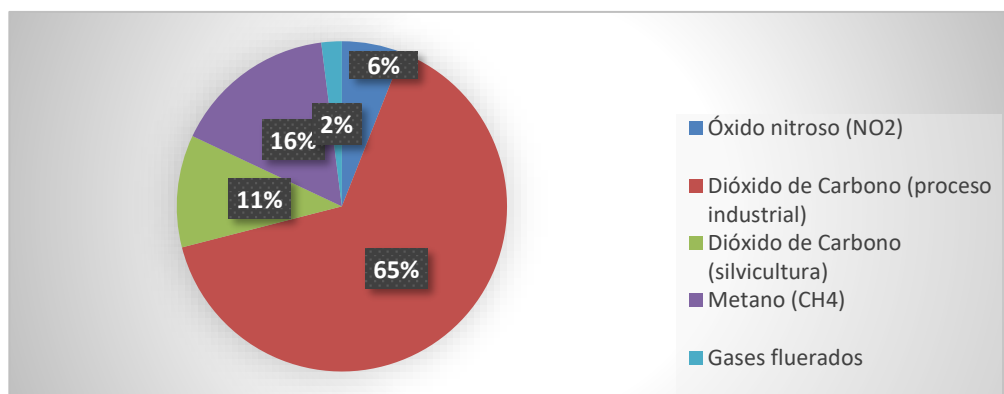


Figura 3. Porcentajes de GEI (EPA Unites States Environmental Protection Agency, n.d.)

1.1.2. Sectores afectados. Sector del refresco

A nivel nacional e internacional, el dióxido de carbono se encuentra de manera natural en la atmósfera como parte del ciclo del carbono del planeta. Las actividades del ser humano están alterando el ciclo del carbono debido a que suman más CO_2 a la atmósfera, a que afectan de manera directa a la capacidad de los disipadores naturales (como los bosques) para eliminar el CO_2 de la atmósfera e influyen sobre la capacidad de las tierras para almacenar carbono. (Ritchie Hannah et Roser Max et al., 2020)

Las emisiones vienen determinadas por la quema de combustibles fósiles para la producción de energía y la producción industrial de materiales como por ejemplo el cemento. En la Figura 4, se muestra una variación de las cantidades de toneladas de CO₂ a lo largo del tiempo en la cual se observa como en la industria del cemento se emite la mayor parte de este gas, unos 350 millones de toneladas, aunque en la actualidad se ha reducido esta cantidad.

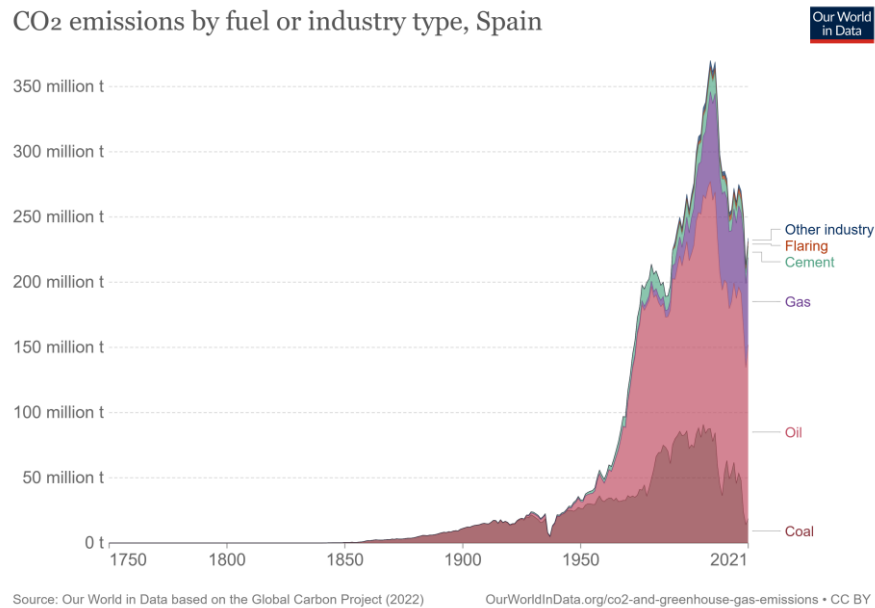


Figura 4. Emisiones de CO₂ por combustible o tipo de industria (Ritchie Hannah & Roser Max et al., 2020)

Por otro lado, es conveniente determinar cuáles serían los principales sectores de emisión. En la Figura 5 se destaca que el sector del transporte es el que más dióxidos de carbono (CO₂) aporta a la atmósfera y las emisiones fugitivas la que menos. (Ritchie Hannah & Roser Max et al., 2020)

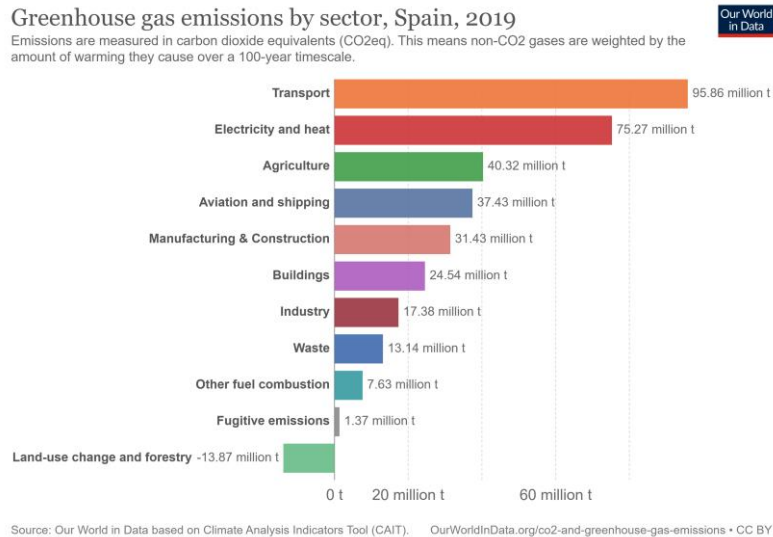


Figura 5. Emisiones por sector (Ritchie Hannah & Roser Max et al., 2020)

En cuanto al sector del refresco, tema en el que se centra el trabajo, cabe destacar que estos tienen una larga historia dentro del mundo de las bebidas ya que empezaron a producirse con fines farmacéuticos, pero hoy en día han evolucionado según la necesidad de la población hasta convertirse en una opción para acompañar a cualquier comida.

El CO₂ es un ingrediente principal para la producción de refrescos y es una de las sustancias más importantes en la producción de refrescos, vino, cerveza, etc. Se utiliza de diversas formas entre las cuales la que más destaca sería la adición de dióxido de carbono como estabilizador del sabor. Otro uso común del CO₂ es el lavado de piezas o las unidades de llenado. Se utiliza para desplazar el oxígeno, reducir la formación de espuma y preservar así el sabor de la bebida. En las fábricas más actuales, se recicla por motivos económicos y ecológicos. (Drägerwerk AG & Co. KGaA, n.d.)

Por otro lado, existe un riesgo de toxicidad a nivel del suelo, es decir, en la fabricación, el dióxido de carbono se utiliza habitualmente en estado gaseoso. El gas es 1,5 veces más pesado que el aire y, por lo tanto, tiene la propiedad específica de acumularse a nivel del suelo. Esto supone un problema a la hora de manejar la sustancia, ya que cualquier escenario de fuga o desbordamiento puede dar lugar a concentraciones altas. Para ello se aplica el monitoreo de las concentraciones de CO₂ en las zonas de trabajo de la industria de bebidas donde se requiere, y se siguen algunas indicaciones: etiquetado de espacios confinados, una medición de acreditación de los espacios antes de llevar a cabo la tarea pertinente; monitoreo del aire ambiente con un dispositivo portátil de medición de gases mientras se trabaja en contenedores; monitoreo continuo de área mediante sistemas fijos de detección de gas en áreas de trabajo extensas. En definitiva, es un compuesto que hay que tener controlado para evitar trabajar por encima de los índices establecidos.

El CO₂ se aplica en diferentes procesos dentro de esta industria, como la fermentación, presurización y lavado, inertización. En el caso de la producción del refresco de burbujas, el CO₂ se emplea en la carbonatación (Figura 6), como se verá en la siguiente sección. Esta técnica que le da a la bebida su carácter efervescente y que consiste en aditar dióxido de carbono al líquido. El objetivo es liberar la mínima cantidad de dióxido posible y conseguir

una proporción óptima en la mezcla.



Figura 6. Proceso de carbonatación (Drägerwerk AG & Co. KGaA, n.d.)

En la actualidad el mundo de los refrescos se encuentra en evolución y al igual que se busca la sostenibilidad para ser más respetuosos con el medio ambiente (envases reciclables, empleo del vidrio, ...) hay que tener en cuenta las emisiones de CO₂ a la atmósfera invirtiendo en tecnologías y procesos más eficientes

Existen diferentes alternativas para la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera, entre las cuales se encuentran la mejora de la eficiencia energética o la producción de energía a partir de energías renovables. Aunque cabe destacar que la alternativa que se presenta en este trabajo son los sistemas de captura de CO₂ para un posterior almacenamiento. Esta alternativa está orientada a la reducción de las emisiones de este gas provenientes de grandes focos emisiones de actividad antropogénica. El hecho de que se enfoquen a este mercado se justifica por la reducción de los costes del proceso de captura y transporte, alcanzando una mayor competitividad económica, y facilitando su implantación a gran escala.

En definitiva, con todo lo comentado anteriormente, es necesario la toma de nuevas e ingeniosas decisiones para contrarrestar este impacto ambiental provocado por el CO₂ principalmente.

1.1.3 Sistemas de Captura de CO₂. Sistemas postcombustión

A día de hoy, aparecen métodos (aunque con una repercusión insólita) que permiten continuar utilizando combustibles fósiles reduciendo enormemente las emisiones de CO₂. Estos son llamados sistemas de captura de CO₂ que tendrán importancia a medio plazo en el sector eléctrico y permitirán reducir las emisiones sin necesidad de realizar una reforma energética completa, que obligue a limitar el uso de combustibles fósiles como fuente de energía. (Global CCS Institute, 2016)

Sin embargo, estos sistemas presentan dificultad para introducirse en diferentes plantas químicas que utilicen combustibles fósiles como fuente de energía, bien por razones técnicas, o principalmente por razones económicas. Para capturar el CO₂ es necesario disponer de una o varias corrientes con un alto porcentaje de este compuesto, tanto para reducir los costes de sistema de captura, como para que el sistema alcance un rendimiento

elevado. Los sistemas de captura que se tratarán en este estudio se basan en un proceso de captura de CO₂ a partir de una corriente con un alto contenido en este compuesto, su compresión, filtración, depuración, y su posterior almacenamiento.

En la siguiente figura (Figura 7) (Global CCS Institute, 2016) se muestra la evolución de la capacidad de captura y la posible previsión de la misma hasta la actualidad (en megatoneladas métricas por año - Mtpa), y se ve cómo es posible ir en aumento gracias al uso de nuevas tecnologías.

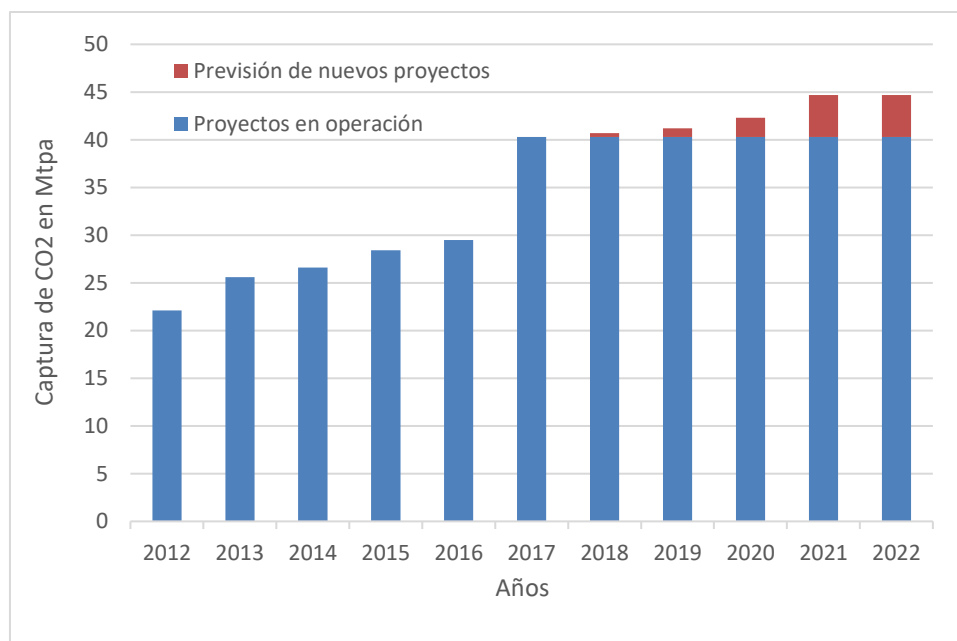


Figura 7. Captura de CO₂ en Mtpa a nivel mundial (Global CCS Institute, 2016)

Dentro de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ (CAC) el proceso de captura en sí representa aproximadamente un 75% ((IISD International Institute for Sustainable Development, n.d.) en términos de coste total y supone un gran reto económico y tecnológico. Son aplicables a grandes focos de emisión y, de forma general, implican una importante pérdida de eficiencia para el proceso. El objetivo de la captura de CO₂ es producir una corriente concentrada de este gas que pueda transportarse a un determinado lugar o incluso su recirculación a un mismo proceso.

En la Figura 8 se muestran los diferentes sistemas de captura, los cuales se explican en detalle posteriormente (Eva López Mérida, n.d.)

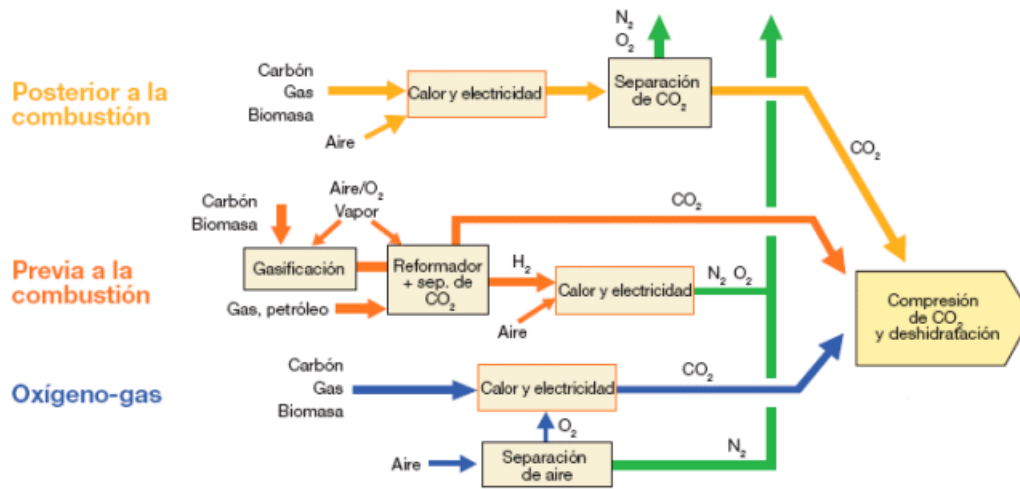


Figura 8. Sistemas de captura de CO₂ (Eva López Mérida, n.d.)

Los sistemas de captura y almacenamiento de CO₂ tan solo son aplicables en grandes puntos de emisión de CO₂. El objetivo de estos sistemas es separar este compuesto producido hasta obtener una corriente de gases con una concentración de CO₂ suficientemente elevada. Una vez se dispone de esta corriente se procede a su compresión para realizar el transporte hasta el punto donde vaya a ser almacenado de forma definitiva. De forma general los sistemas de captura de CO₂ se pueden clasificar en tres grandes grupos: postcombustión, precombustión y oxycombustión. Este trabajo se centra y profundiza en los sistemas de captura de CO₂ postcombustión, por lo que antes de entrar en materia, se observa ventajas e inconvenientes de los diferentes sistemas de captura:

Tabla 1. Características de los sistemas de captura de CO₂ (Maria del Carmen Clemente & Julio Rodrigo Naharro, n.d.)

SISTEMAS DE CAPTURA	VENTAJAS	INCONVENIENTES
POSTCOMBUSTIÓN	<ul style="list-style-type: none"> -Se emplea disolvente químico para ponerse en contacto con la corriente gaseosa. -En otro equipo se libera el CO₂ para que el absorbente esté disponible para reaccionar con el CO₂ nuevamente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Gran inversión para tratar grandes volúmenes de gas, es decir, su caudal a tratar; a bajas presiones (rango de 3 a 15 bar) y con impurezas, es decir, material particulado como las PM10. -Requerimiento energético elevado.
PRECOMBUSTIÓN	<ul style="list-style-type: none"> -Permite producir un combustible libre de carbono. -El CO₂ se separa en una corriente de menor volumen. 	<ul style="list-style-type: none"> -La etapa de procesamiento de combustible es mucho más tediosa.
OXYCOMBUSTIÓN	<ul style="list-style-type: none"> -Se combustiona corriente de oxígeno puro o enriquecido de aire y se obtiene CO₂ y agua principalmente. 	<ul style="list-style-type: none"> -Alto coste en la producción de oxígeno. -Necesidad de recircular grandes cantidades de gases de escape, para mantener T combustión.

Las tecnologías de captura de CO₂ en postcombustión tienen como función separar el CO₂ de la corriente de gases a la salida del proceso de combustión convencional del combustible fósil o biomasa, empleando aire como comburente (Mondal M. & Balsora H. et al., 2012)(Cámara Á. & Ramos A. & et al., n.d.). Estas tecnologías se

ubican aguas abajo del proceso donde se genera y funcionan mediante la instalación de un equipo de depuración de gases para un componente en concreto, en este caso, el CO₂. Como la mayoría de las empresas emplean aire como comburente, la tecnología puede aplicarse directamente como retrofiting, dando lugar a una buena capacidad de adaptación a las condiciones operativas de la instalación. En la Figura 9 queda reflejado un diagrama de bloques en el cual se destaca una unidad de generación de energía donde entran las corrientes de combustible y aire, cuya misión es el aporte energético al proceso y, posteriormente, una unidad de separación para capturar el CO₂ contenido en los gases de combustión.

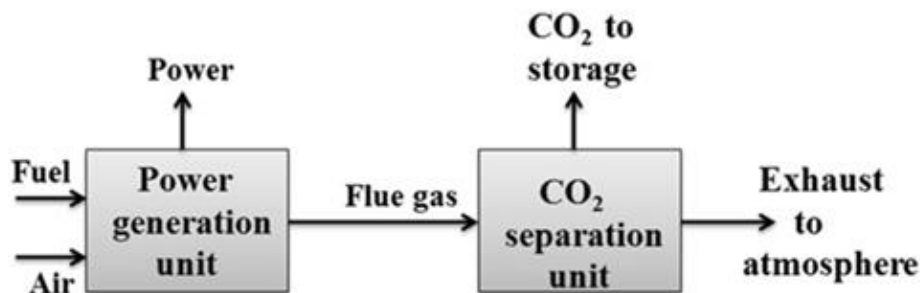


Figura 9. Diagrama de bloques sistema postcombustión (Mondal M. & Balsora H. et al., 2012)

Los sorbentes empleados para la captura requieren de una gran cantidad de energía para su generación, dando lugar a un coste de inversión y operación elevados debido a la tecnología comercial disponible (Mondal M. & Balsora H. et al., 2012). A continuación, se describen, de manera breve, algunos de los métodos dentro de este sistema de captura:

1.1.3.1. Absorción química

Los procesos de absorción basados en agentes químicos es la opción más adecuada para los procesos de captura después de la combustión cuando el porcentaje de CO₂ es baja. Se trata del método que más se aplica a escala piloto en la industria, para la separación de CO₂ de un flujo de gases y en la actualidad es una tecnología bastante desarrollada para la purificación de gas natural y la producción de CO₂ para usos comerciales (industria alimentaria, producción de NH₃ y urea para producción de fertilizantes). En la Figura 10 se muestra un diagrama de bloques donde hay una captura del gas que se quiere reducir por medio de la absorción de CO₂ junto con una regeneración de solvente con el fin de tener un proceso en recirculación (Wenzhao Zhang & Chenbin Ma. et al., 2022).

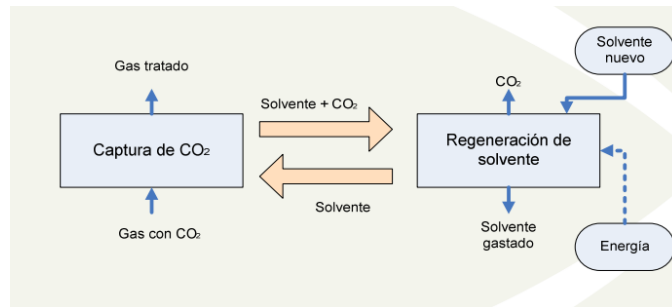


Figura 10. Diagrama de bloques absorción química (Wenzhao Zhanga et & Chenbin Ma. al., 2022)

Los solventes con más interés comercial son las aminas, en concreto la monoetanolamina (MEA) que se emplea para la reducción de la presión de vapor y la solubilidad en el agua. El grupo amino provoca la alcalinidad en las soluciones necesarias para la absorción de gases ácidos. A continuación, se representan en la Figura 10 (Wenzhao Zhanga & Chenbin Ma. et al., 2022) un diagrama de flujo donde queda reflejado cada una de las corrientes y equipos que intervienen aplicando la MEA como reactivo. En el sistema se introduce la corriente de gas por el absorbedor que se pone en contacto con la amina, pasa por el fondo de la columna y mediante la impulsión de una bomba hacia un intercambiador. A continuación, llega al stripper donde se separa el CO₂ para su posterior almacenamiento y la MEA vuelve en la recirculación.

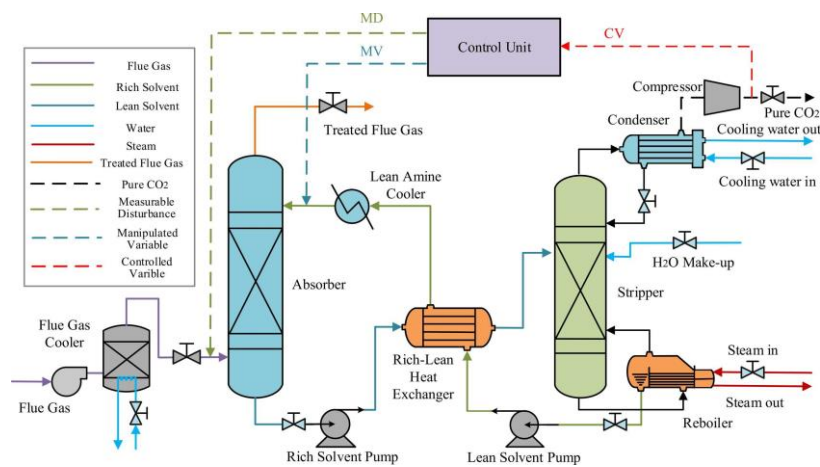


Figura 11. Diagrama de flujo con MEA como reactivo (Wenzhao Zhanga & Chenbin Ma. et al., 2022)

Uno de los parámetros por los que se rige el tamaño, coste y viabilidad técnica de este proceso es la concentración de CO₂, es decir, los focos emisores de CO₂, elevan su concentración desde un 10-15% (concentración media inicial en los gases de escape) a una concentración elevada de CO₂ para, a continuación, seguir su proceso de compresión, transporte y posible uso.

1.1.3.2. Absorción física

Proceso cuyo componente a eliminar de la corriente gaseosa es más soluble en el líquido que los demás componentes, pero no hay reacción química con el absorbente. La concentración en la fase líquida depende principalmente de las presiones parciales de los gases a capturar, y de carácter general estos métodos permiten la eliminación de gases ácidos como el H₂S, además del CO₂. Algunos, además, pueden permitir la captura de modo selectivo o simultáneo. Algunos ejemplos por destacar serían: proceso Selexol, donde la absorción de sulfuro de hidrógeno (H₂S) y CO₂ en el dimetil éter de polietilenglicol; proceso Rectisol, similar al anterior, pero diseñado para gases con presencia de pequeñas cantidades de hidrocarburos; proceso Purisol, ideal para la eliminación del sulfuro de hidrógeno, pues la afinidad entre el solvente (comúnmente se emplea N-Metilpirrolidona, también conocida como NMP o N-Metil-2-pirrolidona que se encuentra típicamente como un líquido incoloro y puede operar a temperatura ambiente o a temperaturas inferiores a -15 °C) y este gas es mucho mayor.

Respecto al Selexol, permite la captura selectiva (en este caso, es necesario disponer de dos etapas, para capturar primero el H₂S y después el CO₂), o simultánea del H₂S y el CO₂, cuando estos se encuentran presentes con altas presiones parciales. En el caso de la captura selectiva (Figura 12), para capturar el H₂S se emplea una corriente de solvente con alto contenido en CO₂. Posteriormente, el gas libre de ácido sulfhídrico entra en la segunda torre de absorción, donde se captura el CO₂ con solvente con bajo contenido en CO₂.(Zaman, 2013)

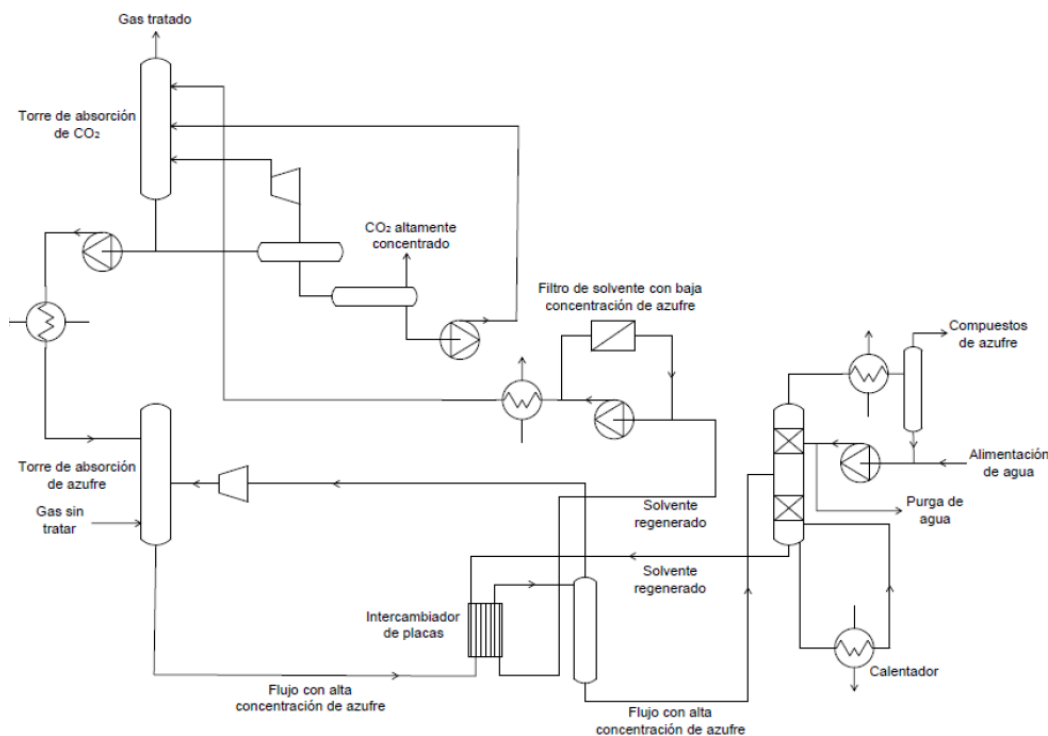


Figura 12. Diagrama de flujo de un proceso simplificado de Selexol (Zaman, 2013)

En cuanto al proceso Rectisol, permite capturar simultánea o selectivamente el H₂S y el CO₂, al igual que el proceso Selexol. Este proceso está diseñado para gases con presencias muy reducidas de hidrocarburos, y se

adapta a multitud de procesos químicos de purificación de gases. No obstante, su configuración es mucho más compleja que la mayoría de los procesos de absorción física. Emplea metanol como solvente, y opera a temperaturas comprendidas entre los $-62\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, pues su presión de vapor es elevada.

En cuanto al proceso Purisol, es ideal para la eliminación del H_2S , pues la afinidad entre el solvente y este gas es mucho mayor que la afinidad entre el solvente y el CO_2 (del orden de 10 veces superior).

1.1.3.3. Adsorción

Este sistema se ha usado con frecuencia en la industria química, aunque a día de hoy se encuentra en una investigación más profunda. Normalmente se emplea en sectores como la purificación del gas natural o la producción del amoníaco. Se desarrolla a alta presión por lo que para aplicarlo a plantas donde los gases que salgan al exterior tengan una presión cercana a la atmosférica lo cual requiere una etapa de compresión previa (hasta un mínimo de 20 bar), aumentando el coste de operación.

Se trata de un proceso cíclico adsorción más uno de regeneración. En el caso de adsorción física, persiste hasta alcanzar el equilibrio lo que implica regenerar el solvente. Para ello, se puede se puede cambiar la presión (PSA) o variar la temperatura del adsorbente (TSA). También es posible impregnar superficies (principalmente de alúmina y sílice) con especies químicas como las aminas o el carbonato potásico, formando solventes sólidos. Estos ofrecen una mayor capacidad de captura y selectividad del CO_2 y ratios de adsorción/regeneración elevados en comparación con la física (López Fuentes, n.d.)

Un ejemplo de este método sería el de la siguiente Figura 13, el gas pasa a través del empaque, lugar donde se hace una adsorción selectiva hasta que el adsorbente alcanza el equilibrio

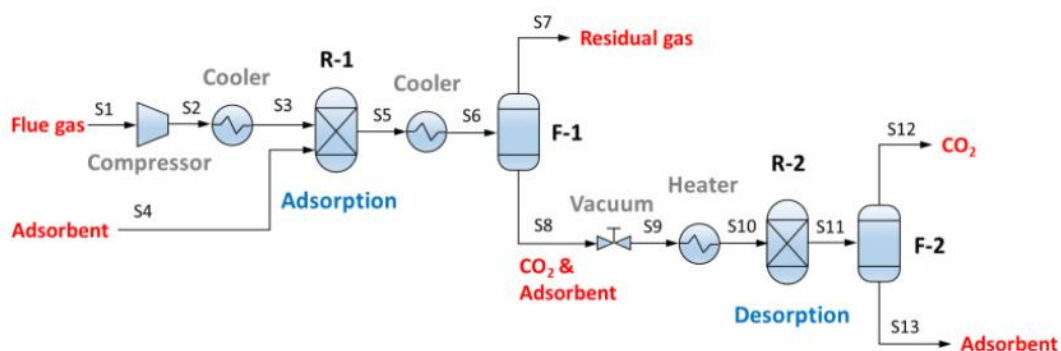


Figura 13. Diagrama de Flujo de un Proceso Típico PSA (López Fuentes, n.d.)

1.1.3.4. Membranas

Por lo general, los procesos de separación de membrana se utilizan comercialmente para la eliminación de CO₂ del gas natural, donde las concentraciones varían entre un 3-20% vol. En estas corrientes, la presión de operación y la concentración de CO₂, son altas y la corriente se compone principalmente de CO₂ y CH₄. Esta corriente es muy diferente de la corriente que se encontraría en las corrientes de gas posterior a la combustión que contienen impurezas como NO_x y SO_x y están a presión atmosférica. La Figura 14 es una representación general de una membrana de separación de gases, donde queda reflejado lo dicho anteriormente. (Spigarelli & Kawatra, 2013)

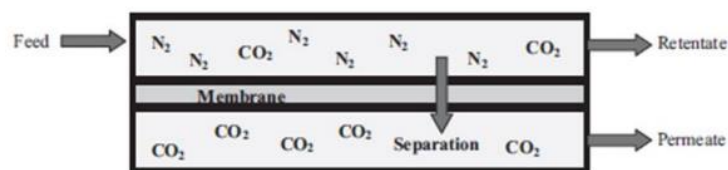


Figura 14. Esquema general de separación de membranas (Spigarelli & Kawatra, 2013)

En general, la membrana actúa como un filtro para eliminar uno o más componentes de una mezcla gaseosa y generar un componente con alta pureza. La fuerza impulsora de las membranas selectivas es la diferencia de presión entre el lado de alimentación y el lado permeado de la membrana, como se observa en la Ley de Fick (Spigarelli & Kawatra, 2013):

$$J_i = \left(\frac{P_i}{d}\right) \cdot A_m \cdot \Delta p \quad [\text{Ecuación 1}]$$

Donde J_i es el flujo volumétrico del componente i a través de la membrana, expresado en $\text{kmol} \cdot \text{m} / \text{s}$; P_i es la permeabilidad de la membrana en términos de componente i , expresado en $\text{kmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{bar}$; d es el grosor de la membrana, en m ; A_m es el área de la membrana, expresada en m^2 ; y Δp es la diferencia de presión en bar , a través de la membrana o, el equivalente a la fuerza impulsora.

La ley de Fick muestra la importancia del diferencial de presión y permeabilidad en separación de membrana; como la presión diferencial y la permeabilidad aumentan, el flujo de un componente específico a través de la membrana también aumenta. Se destacan dos características que describen el desempeño de una membrana, permeabilidad y la selectividad. La permeabilidad se define como el volumen de especies gaseosas que pasan por la membrana por unidad de tiempo y área. Sin embargo, la selectividad está determinada por la diferencia de permeabilidad de las especies gaseosas, es decir, la selectividad cuantifica la preferencia de una membrana para dejar pasar una especie de gas sobre otra. Por ejemplo, usando la Figura 14, si la permeabilidad del CO₂ a través de la membrana es siete veces mayor que para el N₂, el flujo de permeado contendrá siete veces más moléculas de CO₂ que moléculas de N₂ en cualquier momento.

La permeabilidad y selectividad de las membranas dependen principalmente de las características de la corriente

de gas, es decir, de la velocidad, del peso molecular y del diámetro cinético del componente gaseoso que se desee separar de la corriente principal; del material de la membrana; y de cómo se sintetiza la membrana. Las membranas poliméricas generalmente exhiben alta permeabilidad al CO₂, pero baja selectividad. Si se altera los parámetros de temperatura, presión o concentración se podrá conseguir un control sobre las permeabilidad y selectividad. (Spigarelli & Kawatra, 2013)

Por otro lado, las membranas inorgánicas, suelen ser muy selectivas, pero tienen una menor permeabilidad al CO₂ que la mayoría de las membranas poliméricas, lo que limita su aplicación para la captura de CO₂. Sin embargo, la mayoría de las membranas inorgánicas exhiben excelentes estabilidad térmica y química. Un diagrama de flujo simplificado de captura de CO₂ en post combustión basada en membranas se puede ver en la Figura 15.

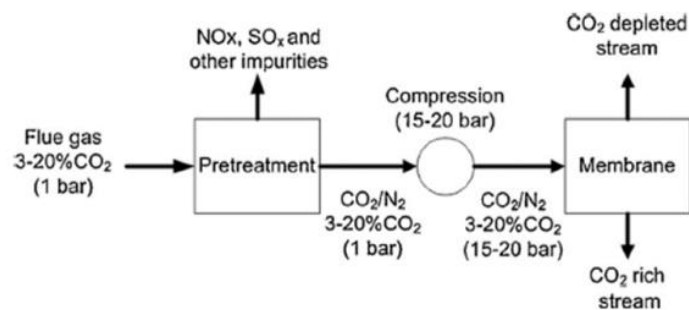


Figura 15. Diagrama de flujo simplificado de captura de CO₂ (Spigarelli & Kawatra, 2013)

1.1.3.4.1. Tipos de Membranas

Las membranas se sintetizaban por procesos naturales con polímeros como la celulosa y la goma, pero ahora muchas se producen sintéticamente. Los polímeros sintéticos se producen por reacciones de condensación o por monómeros de radical libre. El resultado es un polímero que se puede caracterizar por diferentes características como son: una cadena larga (polietileno); una cadena ramificada (polibutadieno); una estructura reticulada moderada; o bien una estructura tridimensional, como el fenol-formaldeído.

Los polímeros se diferencian en amorfos y cristalinos. En ocasiones el polímero amorfo se transforma en uno de estado gomoso y esto ocurre cuando la temperatura alcanza un determinado valor, denominado temperatura de transición vítrea. Si la temperatura en un polímero cristalino aumenta, lo probable que llegue a una temperatura en la cual se derrita, llamada temperatura de fusión del material. A continuación, se muestra en la Tabla 1 los materiales usados en membranas (J.D. Sealer & Ernest J. Henley et al., 2011).

Tabla 2. Materiales empleados para la conformación de membranas poliméricas Adaptado de (J.D. Sealer & Ernest J. Henley et al., 2011)

POLÍMERO	Tipo	Temperatura Transición Vítrea °C	Temperatura de Fusión °C
Polisopreno	Amorfo (gomoso)		-70
Poliamida aromática	Cristalino	275	
Teflón	Cristalino	327	

En permeación de gases normalmente se emplean membranas densas, donde las especies son absorbidas en la superficie de la membrana del lado rechazo, y luego son transportadas a través de la membrana. Si la membrana es microporosa, el tamaño de poro es extremadamente importante ya que es necesario para bloquear el paso del gas menos permeable. De lo contrario, sólo se conseguiría obtener un bajo grado de separación en este tipo de membranas, aunque los pesos moleculares de ambos gases difieran bastante.

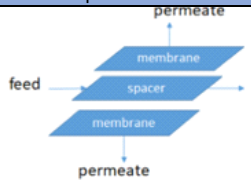
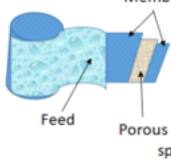
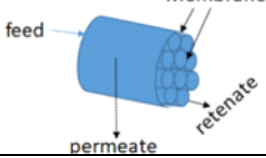
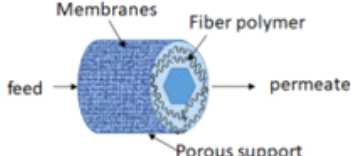
El objetivo en el desarrollo de nuevas membranas es incrementar la permeabilidad y selectividad, incrementar la permeabilidad sin comprometer la selectividad, o mejorar la selectividad a permeabilidad constante.

1.1.3.4.2. Tipos de Módulos de Membranas

Se puede definir como módulo de membrana como el elemento más simple de la misma que puede utilizarse en la práctica y entre las principales funciones destaca: debe proveer de soporte y cierres para mantener la integridad de averías y fugas de la membrana; debe desplegar la corriente de alimentación para lograr un íntimo contacto con la membrana; debe permitir la salida fácil del permeado y permitir la limpieza y mantenimiento de la membrana.

En cuanto a los tipos de módulos de membranas empleados cabe destacar 4 tipos, como son: placas y marcos; haz en espiral; tubular; fibra hueca. En la siguiente Tabla 3, se hace una comparativa de los tipos que hay, junto con sus ventajas en inconvenientes.(Pasichnyk M & Stanovsky P et al., 2023).

Tabla 3. Tipos de módulos de membranas. Ventajas e inconvenientes asociados. (Pasichnyk M & Stanovsky P et al., 2023)

Nombre	Representación	Ventajas	Desventajas
Módulo Placa plana		Caída de presión más baja	La membrana tiene que estar apoyada
		Se puede cambiar fácilmente	Menor área
		Se puede limpiar del polvo	Presión limitada por el tamaño y rigidez
Módulo en espiral		Baja caída de presión	El coste es menor que sus configuraciones previas
		Área elevada de membrana	Necesita un apoyo en la membrana
		aceptable energía de consumo	Sensible al material particulado
Módulo tubular		Puede ser limpiada química o mecánicamente y	Alto coste de operación
		Ofrecen una importante diferencia de presión	Menor área
		Usualmente tubos cerámicos	
Módulo de fibra hueca		Ofrecen alta área de membrana	Difícil controlar ensuciamiento de la membrana a costa del polvo
		Pueden operar a altas presiones	

En permeación de gases los módulos de membranas más aplicados son los de haz en espiral y fibra hueca, (J.D. Sealer/ Ernest J. Henley/ D. Keith Roper, 2011) debido a su menor coste como principal característica. En menor medida, se usan los de módulo placa-marco y tubular, aunque presentan una baja densidad de empaquetamiento, lo que les confiere una menor área de retención para la captura en la corriente de gases.

El haz en espiral consiste en láminas planas que se fabrican en módulos enrollados en espiral, tal como se observa en la Figura 16.(J.D. Sealer/ Ernest J. Henley/ D. Keith Roper, 2011),(Nelson Izaguirre, 2009). Dichas láminas consisten en dos membranas separadas las cuales son atravesadas por la alimentación y el permeado; se enrolla alrededor de un tubo central de recolección perforado para formar un módulo que se inserta en un recipiente a presión. La alimentación fluye axialmente en los canales creados entre las membranas por espaciadores porosos. Por último, el permeado pasa a través de la membrana, hacia dentro en un camino en espiral hacia el tubo central. A partir de ahí, el permeado fluye en cualquier dirección axial dentro y fuera del tubo.

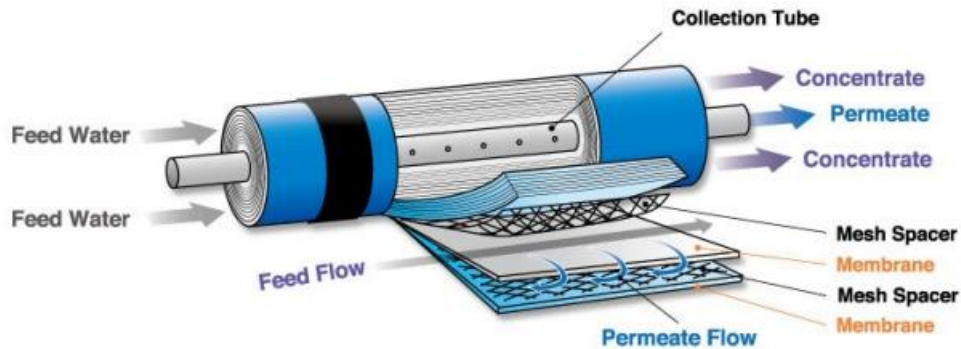


Figura 16. Módulo de haz en espiral (J.D. Sealer & Ernest J. Henley et al., 2011), (Nelson Izaguirre, 2009)

En cuanto al módulo de fibra hueca (Figura 17) para la aplicación de permeación de gases, se asemeja a un intercambiador de calor de carcasa y tubos. La alimentación puede entrar por los tubos y el permeado saldría por el lado de la carcasa o viceversa. En el primer caso, la alimentación presurizada entra por los tubos y mientras fluye de un extremo a otro, el permeado pasa por el lado de la carcasa. Un módulo puede tener 1 m de largo por 0,1 a 0,25 m de diámetro, y contener más de 1 millón de fibras. Un ejemplo de lo descrito se observa en la Figura 17.(J.D. Sealer/ Ernest J. Henley/ D. Keith Roper, 2011)(Mat et al., 2014)

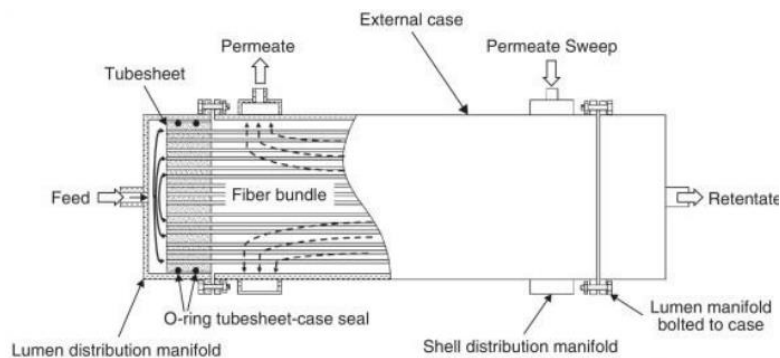


Figura 17. Módulo de fibra hueca (J.D. Sealer & Ernest J. Henley et al., 2011), (Mat N & Lou Y et al., 2014)

1.1.3.4.3. Transporte de gases a través de membranas densas: modelo solución-difusión

En permeación de gases se emplean membranas densas y, para ello, es adecuado aplicar el modelo solución-difusión, que se basa en considerar que el componente a separar de la corriente gaseosa, condensa en la interfase, donde se asume el equilibrio, y luego se difunde gracias a un gradiente de concentración. En la Figura 18 queda representado este modelo indicando que variables interviene:(Pedro Ollero de Castro, 2020)

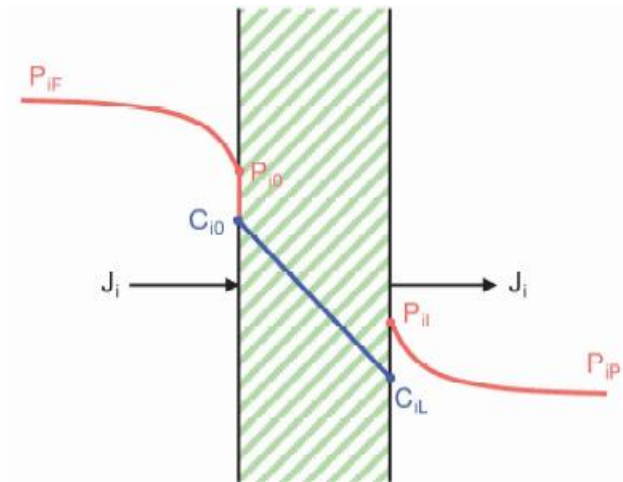


Figura 18. Modelo solución-difusión (Pedro Ollero de Castro, 2020)

Las concentraciones en la membrana están relacionadas con las presiones parciales en el fluido adyacente en la cara de ésta, asumiendo equilibrio termodinámico sólido-fluido en la interfase. Por tanto, aplicando la ley de Henry para el equilibrio de solubilidad, queda las siguientes Ecuaciones 2 y Ecuación 3.

$$H_{i0} = \frac{C_{i0}}{P_{i0}} \quad \text{[Ecuación 2]}$$

Donde:

- H_{i0} : constante de Henry inicial. ($\text{kmol}/\text{m}^3 \cdot \text{bar}$)
- C_{i0} : concentración inicial en la membrana (kmol/m^3)
- P_{i0} : presión parcial inicial (bar)

$$H_{iL} = \frac{C_{iL}}{P_{iL}} \quad \text{[Ecuación 3]}$$

- H_{iL} : constante de Henry en el lado de espesor de la membrana ($\text{kmol}/\text{m}^3 \cdot \text{bar}$)
- C_{iL} : concentración en el lado de espesor de la membrana. (kmol/m^3)
- P_{iL} : presión inicial en el lado de la membrana (bar)

Si se asume que la constante de Henry es independiente de la presión total y que la temperatura es la misma en ambas caras de la membrana, la Ecuación 4 dice:

$$H_{i0} = H_{iL} = H_i \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Dentro de la membrana, al estar produciéndose una difusión de materia, se aplica la ley de Fick como indica la Ecuación 5:

$$N_i = -D_i \cdot dC_i/dL \quad \text{[Ecuación 5]}$$

- N_i : flujo i de masa a través de la membrana ($\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

- D_i : difusión a través de la membrana. (m^2/s)
- L : espesor. (m)

Esta ecuación es una modificación de la nombrada con anterioridad [Ecuación 1], pero significa lo mismo. A esta ecuación se le aplica separación de variables e integrando con las condiciones de contorno:

$$L = 0; \quad C_i = C_{i0}; \quad C_i = C_{iL}$$

Resulta:
$$N_i = \frac{D_i}{e} \cdot (C_{i0} - C_{iL})$$
 [Ecuación 6]

Con la ley de equilibrio se puede sustituir C_{i0} y C_{iL} quedando:

$$N_i = \frac{D_i \cdot H_i}{e} \cdot (P_{i0} - P_{iL})$$
 [Ecuación 7]

- P_{i0} : presión parcial inicial . (bar)
- P_{iL} : presión parcial en el espesor de la membrana. (bar)
- e : espesor de la membrana. (m)

La Ecuación 7 anterior, representa el transporte de gases a través de la membrana, pero en la interfase las presiones no son conocidas, se pueden eliminar de la ecuación usando el modelo de película¹ (Pedro Ollero de Castro, 2020) en los lados alimentación y permeado, sabiendo las presiones parciales:

$$N_i = KF \cdot (P_{iF} - P_{i0})$$
 [Ecuación 8]

- P_{iF} : presión de alimentación. (bar)

$$N_i = KP \cdot (P_{iZ} - P_{iP})$$
 [Ecuación 9]

- $(P_{iF} - P_{iP})$: fuerza impulsora global. (bar)

Juntando todas las expresiones:

$$N_i = \frac{P_{iF} - P_{iP}}{\frac{1}{KF} + \frac{e}{H_i \cdot D_i} + \frac{1}{KP}}$$
 [Ecuación 10]

- $1/KF + e/(H_i \cdot D_i) + 1/KP$: resistencia global a la transferencia de masa.

Si las resistencias a la difusión externa de materia son despreciables en comparación con la de la propia membrana, la expresión de flujo quedaría reducido a: (Pedro Ollero de Castro, 2020)

$$N_i = \frac{D_i \cdot H_i}{e} \cdot (x_i \cdot PF - y_i \cdot PP)$$
 [Ecuación 11]

Siendo x_i e y_i las fracciones del gas i en el lado alimentación y lado permeado respectivamente, y PF y PP las

¹ En el modelo de película se asume que toda la resistencia a la transferencia de masa se localiza en una capa estacionaria de espesor determinado y por ello toda la diferencia de concentración se produce en esa película ficticia (Pedro Ollero de Castro, 2020).

presiones totales en las corrientes alimentación y permeado, respectivamente.

La permeabilidad de un gas se define como el producto del coeficiente de difusión D_i y del coeficiente de absorción H_i . Un incremento en la temperatura tiene escaso efecto en la constante de Henry, pero puede causar un incremento en la difusividad, y un correspondiente incremento en la permeabilidad. Para una membrana dada, en vez de usar la permeabilidad se puede emplear la permeancia, P_{ei} , lo cual es la permeabilidad entre el espesor de dicha membrana. El factor de separación en permeación de gases se define para una mezcla de gases A y B dadas:

$$\alpha = \frac{\frac{y_a}{x_a}}{\frac{y_b}{x_b}} \quad [\text{Ecuación 12}]$$

Si $\alpha > 1$, significa que, A pasa mejor a través de la membrana, es decir, que tiene más permeabilidad que B.

Si $P_{iP} \ll P_{iF}$, las presiones parciales en el lado permeado no influyen. Por tanto:

$$\frac{N_A}{N_B} = \frac{P_a}{P_b} \cdot \frac{x_a}{x_b}$$

Siendo $P_A/P_B = \alpha$ * lo que se define como factor de separación ideal o selectividad.

1.1.3.5. Criogenización

Este proceso consiste en la separación del CO_2 de la corriente empleando la condensación a bajas temperaturas dando lugar a CO_2 líquido, con el objetivo de poder almacenarlo y transportarlo. La criogenización es un proceso que consta de una serie de etapas. En primer lugar, se realiza la compresión, donde los gases de la corriente se comprimen hasta la presión del proceso; a continuación, se purifica, es decir, se realiza un tratamiento de los gases para evitar problemas a largo plazo en columnas de destilación, refrigeradores, etc con el objetivo de eliminar así cualquier sustancia contaminante. También se realiza un intercambio de calor, en cual los gases alcanzan su punto de rocío y posteriormente se refrigera empleando turbinas de expansión que mediante la caída de presión producida disminuye bruscamente la temperatura. Para terminar, se produce la destilación criogénica donde los componentes se separan en distintas columnas de destilación. (Song C. & Kansha Y. et al., 2019)

En la Figura 19 (Baxter Larry L., 2009), se puede ver lo comentado anteriormente, es decir, el resultado final es el CO_2 en fase líquida y una corriente de nitrógeno gaseoso. La eficiencia de captura de CO_2 depende principalmente de la presión y temperatura al final del proceso de expansión. Estas son condiciones relativamente suaves en comparación con otros procesos competitivos. La mayoría de los procesos alternativos no son razonablemente capaces de lograr una captura de CO_2 del 99%. Una característica termodinámica del CO_2 en los gases de combustión (<15% de CO_2 en base seca) es que el CO_2 no formará una fase líquida a ninguna temperatura o presión, sino que el CO_2 se desublima, formando una fase sólida esencialmente pura en lugar de una solución líquida que debe destilarse al necesitar tantos equipos para seguir cada uno de los pasos, es un importante gasto económico. (Baxter Larry L., 2009),

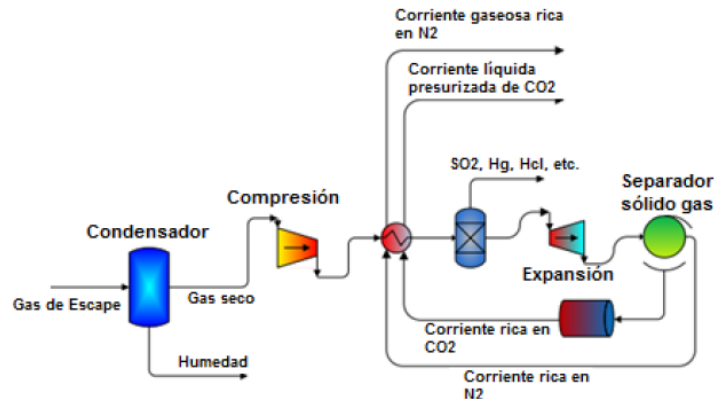


Figura 19. Diagrama de Flujo del Proceso de Captura de CO₂ por Separación Criogénica (Baxter Larry L., 2009)

1.1.3.6. Bacterias

Si se está en un ambiente con una elevada concentración de CO₂, algunas bacterias procariotas son capaces de producir algunos productos de alto valor añadido. En biotecnología aparecen diversas cepas bacterianas, modificadas previamente, dan lugar al ácido láctico que se emplea en la producción del PLA (plástico biodegradable ácido poliláctico). Sin embargo, algunos organismos fotótrofos producen azúcar de manera natural y aquellas que dan lugar a sustancias químicas podrían teóricamente utilizar este azúcar como alimento, convirtiéndose así en un potencial sumidero de carbono.

Los factores que influyen en este sistema de captura son: la temperatura, pH, concentración de nutrientes, niveles de electrones, ... Por tanto, ante la necesidad de proporcionar nutrientes y energía a las bacterias y las condiciones de encontrar el ambiente idóneo para su aplicación, lo hace que sea un sistema de captura ineficaz y aún en estudio. (Chaofeng Li, 2022)

Una vez detallado cada una de las opciones de sistema de captura, se replantea cuál de ellas sería mejor para su aplicación. Se define que, debido a las características y datos de partida ofrecidos, se aplicará la técnica de membrana selectiva.

1.2. El sector de los refrescos

El sector de los refrescos es uno de los ámbitos que contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero y se relacionan con la producción, transporte de bebidas, gestión de residuos, etc.

En primer lugar, Coca-Cola emitió unos 3,8 millones de toneladas de emisiones de gases de efecto invernadero en 2018, según el informe de la organización CDP en 2019. PepsiCo registró para ese mismo año unos 6,5 millones de toneladas métricas de CO₂. La compañía estableció un objetivo de reducción de emisiones del 20% para 2030 y ha implementado medidas como la utilización de energía renovable y la mejora de la eficiencia energética en sus operaciones. Otra empresa como es Font Salem tuvo un dato de emisiones superior, en torno a los 11 millones de toneladas.

Se concluye que este sector no se debe olvidar y se deben aplicar tecnologías que reduzcan esta cantidad de

emisiones para lograr un objetivo común, salvar el medioambiente y reducir tanto las emisiones como la huella de carbono de la empresa A.

Este sector tiene de manera colateral otra problemática, la compleja situación entre Rusia y Ucrania. Entre los ámbitos que se ven afectados por esta crisis se encuentran aspectos económicos, sociales, pero sobre todo alimentario. Existe un problema en la producción de trigo, combustible, fertilizantes (por ende, de CO₂) y estos países son dos principales exportadores. Esto queda reflejado en los siguientes diagramas, representado en la Figura 20: (Fondo Monetario Internacional, n.d.)

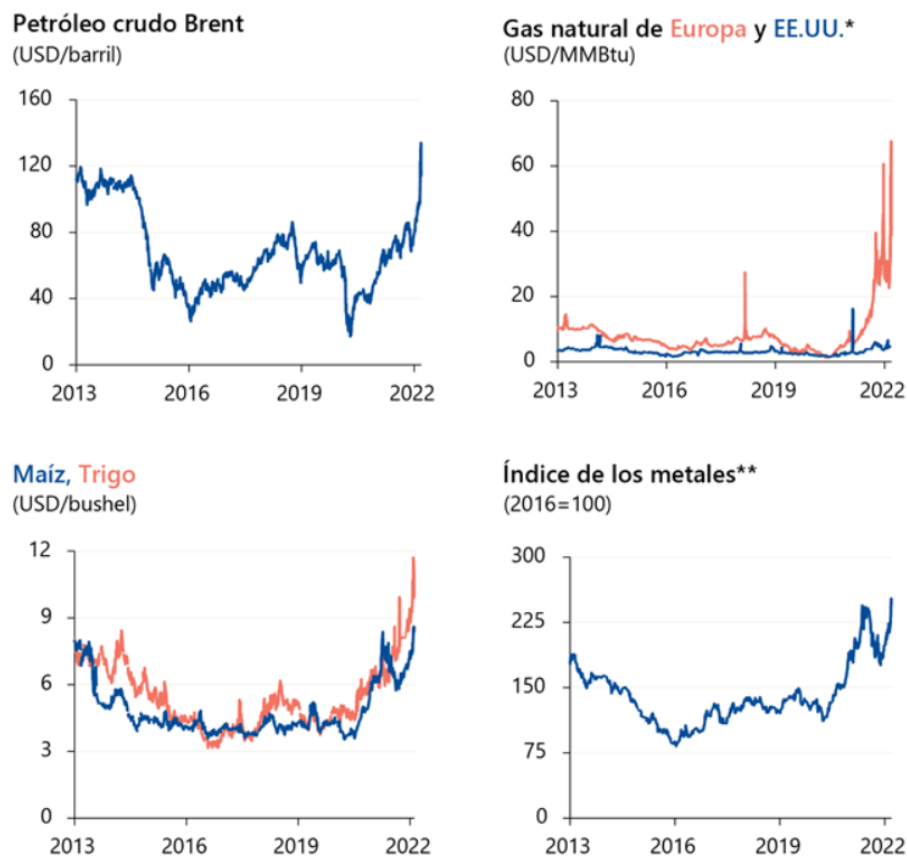


Figura 20. Diagramas de la evolución del precio en diferentes sectores debido a la guerra (Fondo Monetario Internacional, n.d.)

En el primer diagrama de la Figura 23, queda representado la variación del precio del crudo petróleo desde el 2013 hasta el inicio de la guerra. En el segundo, la comparación del precio del gas natural de Europa frente a Estados Unidos, y cómo en el otro continente no hay apenas subida ya que son independientes y ellos mismos son exportadores. El tercer diagrama compara la variación de precio de dos principales fuentes de alimentación como son el maíz y el trigo, y cómo al ser Ucrania el país como más producción, se nota la subida de precios al no haber un mercado con una producción mayor. Por último, tenemos el precio de diferentes metales básicos como son el aluminio, cobalto, cobre... (Fondo Monetario Internacional, n.d.).

Las empresas del sector de la bebida compran tanques de CO₂ para su uso habitual en el proceso (como se verá en la siguiente sección) pero, debido a la guerra, el precio del gas se ha quintuplicado ya que Rusia ha cortado

el suministro de gas natural a la UE, dando lugar a una nueva reestructuración económica (SENDECO2, n.d.). Es por ello por lo que un país tiene que intentar ser autosuficiente y doblarse ante cualquier situación. A continuación, se observa en la Figura 21, lo dicho anteriormente:

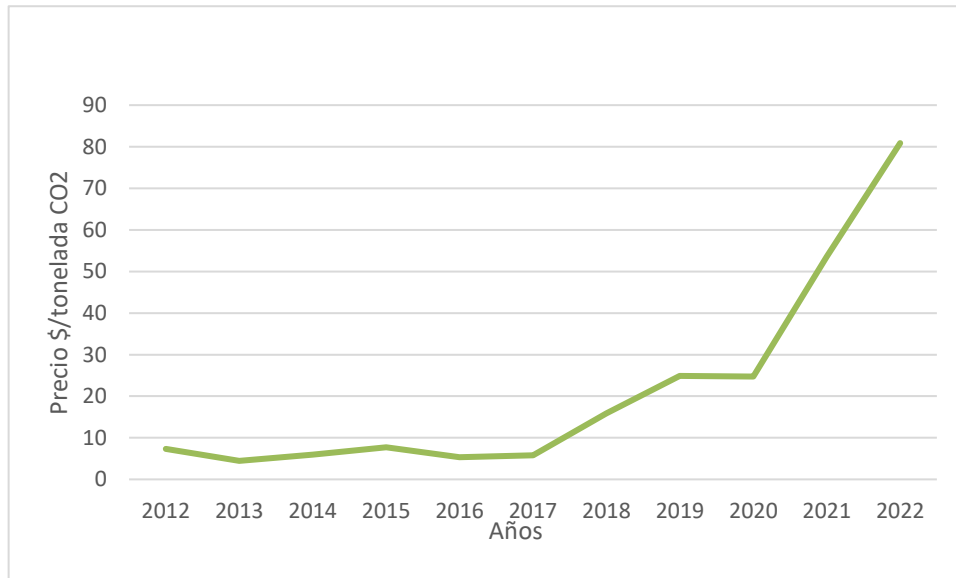


Figura 21. Evolución del precio de CO₂ (SENDECO2, n.d.)

Es por ello por lo que se debe intentar reutilizar parte de ese CO₂ emitido, como pasa de manera habitual en otros ámbitos: en primer lugar, se usa como combustible sintético, es decir, empleando hidrógeno renovable y CO₂ retirado de la atmósfera o de un proceso industrial, se pueden fabricar combustibles sintéticos o efuels, que son cero emisiones netas y se pueden usar en los motores actuales de nuestros coches. Este caso puede ser una alternativa importante dentro del sector del transporte. En segundo lugar, para materiales de construcción, es decir, a partir de la reacción del CO₂ con minerales como el calcio o el magnesio, el dióxido de carbono se puede utilizar para reemplazar el agua en el proceso de producción de materiales de construcción como el hormigón, como describe la IAE, siendo el hormigón curado una de las aplicaciones más prometedoras. Dentro del sector de la construcción en la fabricación de materiales de a partir de residuos y el mismo gas, como es el caso de la empresa PETRONOR situada en Bilbao que incorporará en 2024 una planta de fabricación de ecoáridos con huella de carbón negativo. Su reutilización dentro del ámbito de extinción de incendios donde el CO₂ se utiliza almacenado en extintores para apagar algunos tipos de fuegos, ya que este tipo de gas no es combustible y no reacciona químicamente con otras sustancias. Y, por último, dentro del sector de la conservación de alimentos. La aplicación del dióxido de carbono se emplea de forma común en el envasado de alimentos para controlar el proceso natural de descomposición, prolongar su vida útil y conservar sus propiedades.

En resumen, la realización del CO₂ se puede emplear en diferentes sectores y aunque quizás no esté del todo conseguido en alguno de ellos, es una buena forma de intentar reducir su impacto ambiental.

1.3. Objetivos

El objetivo que se persigue con el desarrollo de este trabajo es minimizar las cantidades de emisiones atmosféricas asociada a una determinada instalación de producción de refrescos carbonatados, reduciendo, en concreto, las emisiones de CO₂ asociadas al proceso de producción.

Para ello, se realiza un estudio de sistemas de captura de CO₂ a través de membranas selectivas, con el fin de almacenar gran parte de ese CO₂ en un depósito bajo condiciones de almacenamiento similares a las de uso del CO₂ en el proceso de producción, que permitan reducir el gasto en la compra de esta materia prima e incluso obtener una estimación de beneficio por su venta.

1.4. Alcance

Para cumplir el objetivo de este trabajo, se plantea un análisis comparativo de dos modelos de membrana: el primero, basado en un modelo de mezcla perfecta y, el segundo, en un modelo de flujo cruzado (variante de flujo pistón y mezcla perfecta) entre la corriente de rechazo y permeado de la membrana.

Para cada caso, se propone el estudio para una mezcla de gases cuya composición viene dada de la combustión de la zona de la caldera, aunque en este caso se analiza el CO₂ junto con el que mayor determinación, a nivel de toxicidad, tenga efecto para un posterior uso ya que así se facilitan los cálculos, aunque no hay que despreciar nada ya que, si no se realiza una separación exhaustiva, las propiedades del dióxido de carbono no cumplen normativa alimentaria (Agencia Estatal BOE, 2011) y no podría reutilizarse dentro del proceso, por lo que, en cuyo caso, se analiza la posibilidad de venderlo como subproducto a empresas que lo necesiten, como sería la eliminación de patógenos.

Para comparar los distintos modelos se plantean un conjunto de ecuaciones basadas en el modelo de película, pero trabajando con presiones parciales en lugar de concentraciones, a partir de las cuales, haciendo uso de un conjunto de datos facilitados por la instalación, así como de una serie de suposiciones, se determinará el porcentaje de CO₂ en la corriente de rechazo y se evaluará cual puede ser la mejor decisión al respecto.

Posteriormente, se realiza un análisis económico tanto de lo que aproximadamente se necesita para la instalación de este sistema de captura, sin la evaluación del precio de los equipos de compresor, filtro e intercambiadores ya que no son estudio específico del mismo, junto con su mantenimiento, y una estimación de lo que se emitirá de CO₂ una vez implantado el sistema de captura junto con lo que se obtendría como beneficio anual según la cantidad de dióxido de carbono junto con otros compuestos, vendidos a otros clientes a precio mayor de mercado. Para esta aproximación se toma valores costes proporcionados en tablas junto con la aproximación de la variación del precio del CO

2. METODOLOGÍA

2.1. Análisis y recopilación de la información

La instalación objeto de estudio de este TFG es una empresa A. Se trata de una empresa ubicada en el municipio de la Rinconada, Sevilla. (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes, n.d.). Se trata del embotellador independiente más grande del mundo para minoristas y marcas de distribución en Europa y Norteamérica. La experiencia en la cadena de suministro global junto con capacidades de innovar da lugar a una enorme variedad de refrescos, según las exigencias de cada cliente.

Para saber en qué zona en concreto se refiere el trabajo, es conveniente un plano de la planta, mostrado en la Figura 22.

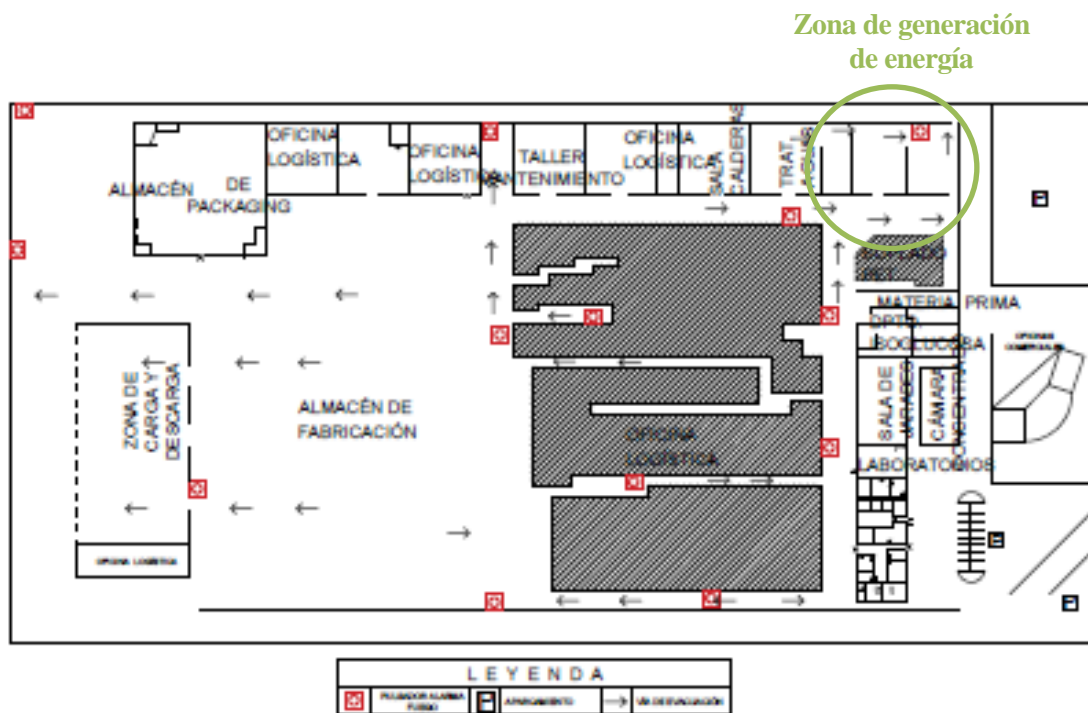


Figura 22. Plano de la planta de la empresa objeto de estudio.

Este trabajo se desarrolla en la parte generación de energía para el proceso de la planta, es decir, la zona de calderas, donde se analizará la corriente de salida postcombustión.

En esta zona cabe hacer referencia al proceso que se sigue, es decir, el proceso que da energía a la carbonatación y a parte de la planta en sí. A través de un depósito de gas natural licuado, se produce la combustión de este en el interior de una caldera y mediante extractores salen todos los gases del proceso. Mientras tanto, mediante el

uso de compresores llega el CO₂ (que se encuentra en un depósito determinado) al proceso que se alimenta de esa energía. Ahí, la temperatura del líquido debe controlarse meticulosamente ya que la solubilidad del dióxido de carbono aumenta a medida que disminuye la temperatura del líquido. Además, hay que tener en cuenta el tipo de refresco que se esté fabricando para saber la cantidad de presión de CO₂ a emplear. En esta zona existe una dificultad para mi propuesta y sería la falta de espacio en la ubicación donde la maquinaria sería necesaria para ello.

A continuación, en la Figura 23 se muestra la caldera objeto de estudio, y en la Figura 24, un diagrama de flujo del proceso de carbonatación mencionado anteriormente.



Figura 23. Ubicación de la caldera a estudio

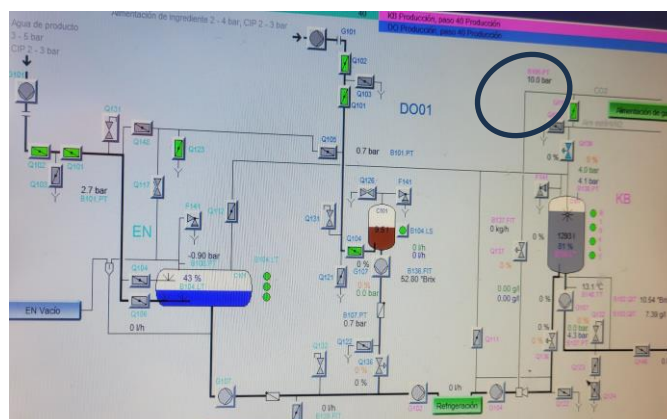


Figura 24. Diagrama de flujo carbonatación

En la Figura 25 se muestra un histórico de las emisiones de CO₂ de la empresa (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes, n.d.).

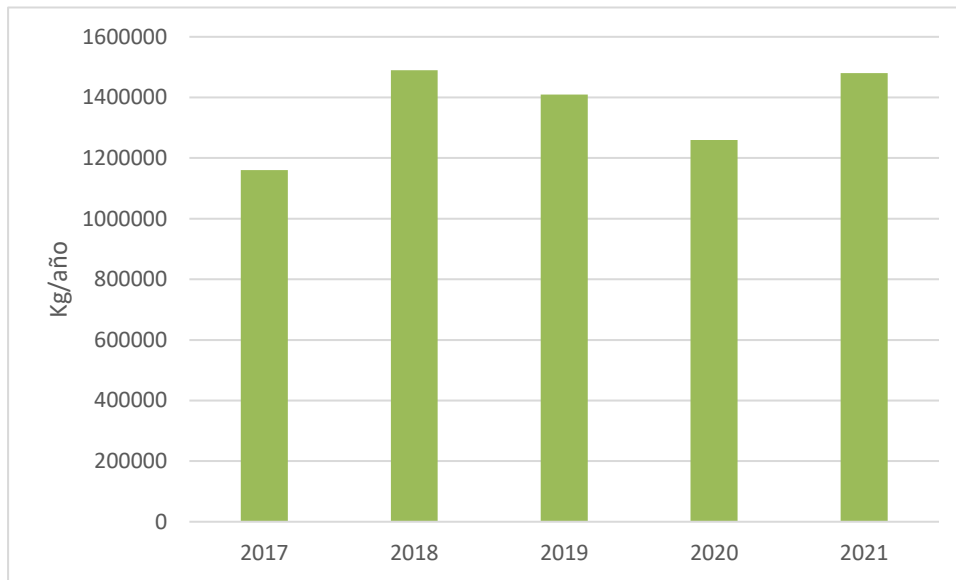


Figura 25. Evolución histórica de las emisiones de CO₂(kg/año) (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes, n.d.).

Según la gráfica mostrada se aprecia que la cantidad de CO₂ emitida va en aumento por lo que se debería actuar para minimizar el número de emisiones y reducir así la huella de carbono.

Hay que destacar que junto al dióxido de carbono se emiten otros tipos de gases, como serían el metano, óxido nítrico, amoníaco, etc., que servirán para determinar la concentración de CO₂ en la corriente de salida a estudiar.

Se presta atención a este punto ya que, con el paso de los años, se ha desperdiciado una cantidad enorme de este gas y se estima que puede ir a más según los datos anteriores. En cuanto a lo económico es cierto que en años anteriores no era tan importante porque la compra de este gas no suponía un coste elevado, pero debido al problema de abastecimiento del mismo por hechos colaterales, se plantea el uso del CO₂ emitido.

Junto con la evolución de las emisiones históricas, se ofrece las emisiones de la planta, las cuales quedan reflejadas en la siguiente Figura 26:

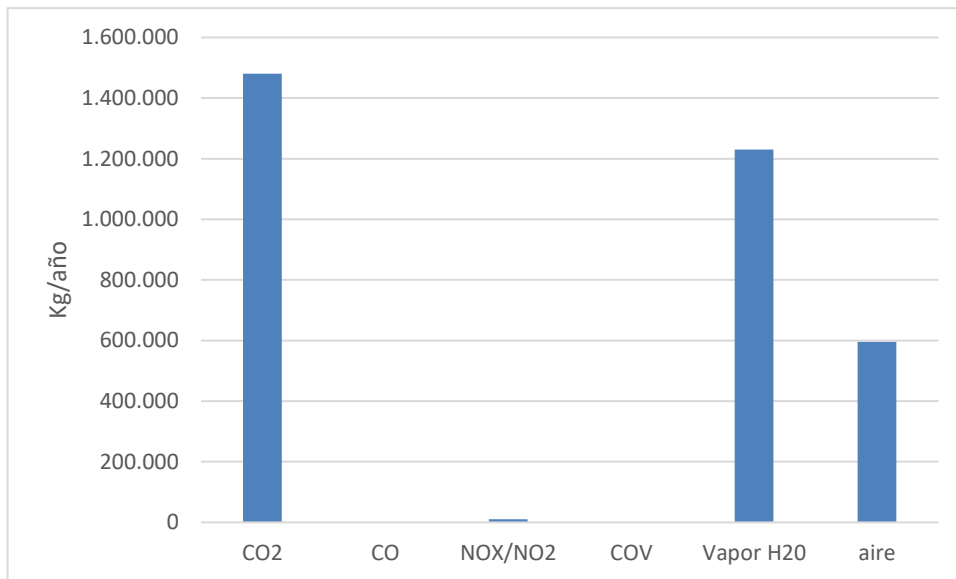
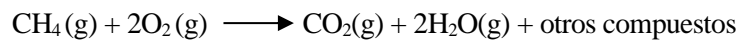


Figura 26. Registros de emisiones gaseosas en la instalación en el año 2021, expresadas en kg/año (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes, n.d.)

Como se aprecia, el dióxido de carbono es el compuesto que más se emite en la zona de calderas, pero no todo proviene de la parte de calderas, aunque para este estudio se realiza la suposición que la mayor parte de la pérdida es de esta zona de proceso ya que es un dato de consumo no reflejado en lo actual. Como dato para tener en cuenta, se sabe que se consume 547 toneladas/año de gas natural (datos precedentes). Al producirse una combustión completa en la mayoría de los casos, se tiene la siguiente reacción:



El gas natural está formado por muchos compuestos, por lo que se forman algunos productos como los óxidos de nitrógeno (NO_x), pero como se ha nombrado anteriormente suponemos solo metano (CH_4). Sabiendo además que el aire se introduce en una proporción de 1:1,6 aproximadamente, se obtiene a la salida de humos los datos reflejados en la Tabla 6.

El otro compuesto a estudiar serán los NO_x ya que en la combustión del gas natural se introduce aire (formado por oxígeno y nitrógeno) y se originan 2640 Kg/año de NO_x . Se observa que no es uno de los gases en que más proporción esté, pero si es fundamental intentar eliminar el compuesto con más interés para cualquier opción en cuanto a un nuevo uso, una posible venta como subproducto, etc.

Tabla 4. Datos de estudio

Compuestos	CH ₄	CO ₂	NO _x	PM ₁₀	COV	SO ₂	H ₂ O
Caudal entrada a membrana (mol/h)	0,21	4279,36	7,17	0,001	0,083	0,22	8558,79
Caudal total (kmol/s)	0,0036						
Temperatura salida humos (°C)	182						
Temperatura almacenamiento CO ₂ inicial (°C)	-18						
Presión almacenamiento (bar)	20						
Presión trabajo (bar)	9						
Presión permeado (bar)	1,2						

2.2 Definición de la configuración del sistema de captura.

Una propuesta para la reducción de emisiones puede ser la reflejada en el siguiente diagrama de bloques (Figura 27):

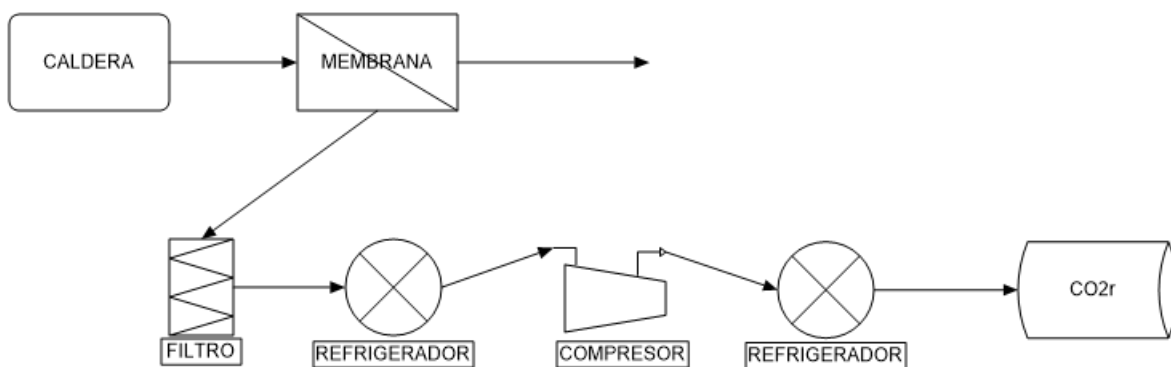


Figura 27. Configuración de sistema de captura de CO₂ propuesto para su implantación en fábrica. (Elaboración propia)

El estudio se lleva a cabo desde la salida de la caldera, es decir, en ese punto tenemos un caudal total de gases con un porcentaje en volumen de CO₂ del 9% v/v en la alimentación a membrana y, posteriormente, un objetivo a conseguir que es un porcentaje de rechazo entorno al 3% v/v para así recuperar por el permeado el máximo dióxido de carbono posible. A continuación, pasará por un filtro de mangas (Sergio Hurtado Melo, n.d.) con el fin de purificar aún más ese CO₂ y poder eliminar materia particulada en suspensión, junto con algunos compuestos orgánicos volátiles (COV) y partículas PM₁₀ que pueda llevar los gases de salida que puedan pasar por la membrana. El siguiente equipo necesario sería un compresor con el fin de conseguir unas condiciones de

presión y temperatura semejantes a las iniciales, es decir, una temperatura de -18°C y 20 bar ya que habría que almacenarlo en un tanque de iguales características al actual, junto con un refrigerador a base de amoníaco (es uno de los refrigerantes más empleados en grandes cámaras frigoríficas y se puede alcanzar temperaturas hasta los -70°C (Intersam, 2022), hasta los -70°C) para bajar la temperatura de éste. Y, por último, este CO_2 capturado quedará almacenado en un tanque criogénico (Asociación Española de Normalización y Certificación, n.d.) de dimensiones adecuadas, según las características del gas a la salida.

Para realizarlo, se plantea una comparativa de dos modelos, uno de mezcla perfecta y uno de flujo cruzado, donde se determina cuál de los dos puede ser el más adecuado en función del porcentaje de CO_2 que más se acerque al 3%v/v buscado. Para ello se calcula el porcentaje a la salida de CO_2 haciendo uso del software de cálculo Engineering Equation Solver (EES), y se ofrece un valor cercano al buscado (3%v/v). Adicionalmente, se realiza una estimación económica para conocer la inversión necesaria para implantar el sistema de captura. Para ello se hace uso de un conjunto de ecuaciones específicas desarrolladas para el uso de membranas.

2.3. Comparativa de modelos

2.3.1 Evaluación de modelo Mezcla Perfecta

En cuanto al modelo de mezcla perfecta, decir que es uno de los modelos más sencillos ya que los gases están perfectamente mezclados, y en cualquier punto del lado rechazo o lado permeado de la membrana se asume que la concentración será la misma que en el resto de los puntos que le rodean. En la Figura 28, queda reflejado lo comentado: (Pedro Ollero de Castro, 2020)

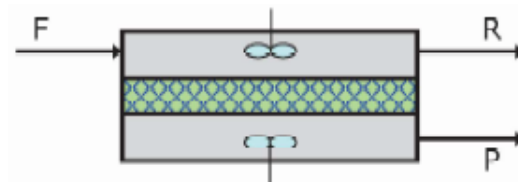


Figura 28. Módulo mezcla perfecta (Pedro Ollero de Castro, 2020)

Para los cálculos se realiza un balance global para determinar las corrientes restantes y por componentes en la membrana, dando lugar a la forma expresado en las ecuaciones 13 e 14:

$$F = R + P \quad \text{[Ecuación 13]}$$

- F: caudal de salida de humos (kg/h)
- R: caudal de rechazo (kg/h)
- P: caudal de permeado (kg/h)

$$F \cdot y_F = R \cdot y_R + P \cdot y_P \quad \text{[Ecuación 14]}$$

- y_F : composición gas de CO₂ alimentación (%v/v)
- y_R : composición gas de CO₂ rechazo (%v/v)
- y_P : composición gas de CO₂ permeado (%v/v)

Por definición de mezcla perfecta, la composición de los gases en cualquier punto del lado rechazo es igual que en el rechazo, y la composición en el permeado en cualquiera de los puntos del lado permeado es la misma que en el permeado. Por tanto, junto con la explicación anterior del modelo de la película:

$$N_A = Pe_A \cdot (P_F \cdot y_R - P_P \cdot y_P) \quad \text{[Ecuación 15]}$$

- N_A : Flujo de CO₂ . (kg/m²·s)
- Pe_A : Permeancia de CO₂ . (kg/m²·s·bar)
- P_F : Presión de alimentación a membrana, salida de humos. (bar)
- P_P : Presión de permeado (bar)

$$N_B = Pe_B \cdot (P_F \cdot (1 - y_R) - P_P \cdot (1 - y_P)) \quad \text{[Ecuación 16]}$$

- N_B : Flujo de NO_x . (kg/m²·s)
- Pe_B : permeancia de NO_x (kg/m²·s·bar)

Por igual causa, la composición de permeado en cualquier punto de la interfase como en cualquiera del lado permeado comparte el mismo valor ($y_{P_0} = y_{P A_m} = y_P$), por lo que la ecuación 17 queda:

$$y_P = \frac{N_A}{N_A + N_B} \quad \text{[Ecuación 17]}$$

También es necesario la ecuación que refleja el cálculo directo del área de la membrana (A_m) en m², ya que los flujos de los gases en cualquier punto de la membrana no varían conforme aumenta el área.

$$P = A_m \cdot (N_A + N_B) \quad \text{[Ecuación 18]}$$

- A_m : área de membrana (m²)

2.3.2. Evaluación de modelo flujo cruzado.

Por otro lado, el modelo de flujo cruzado se trata de una combinación entre mezcla perfecta y flujo pistón. En la Figura 29 se representa este modelo:

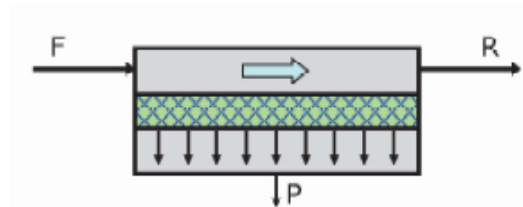


Figura 29. Modelo flujo cruzado (Pedro Ollero de Castro, 2020)

Para este modelo, se aplica un balance diferencial en la membrana:

$$\frac{dR}{dA} = -(NA + NB) \quad \text{[Ecuación 19]}$$

$$\frac{dyR}{dA} = \frac{1}{R} \cdot (yR \cdot (NA + NB) - NB) \quad \text{[Ecuación 20]}$$

Realizando la integración:

$$R_{A1} = R_0 + \int_0^{A1} -(NA + NB) \cdot dA \quad \text{[Ecuación 21]}$$

Siendo $R_{A1} = R$ y $R_0 = F$.

$$yR_{A1} = yR_0 + \int_0^{A1} \frac{1}{R} \cdot (yR \cdot (NA + NB) - NB) \cdot dA \quad \text{[Ecuación 22]}$$

Siendo $yR_{A1} = yR$ y $yR_0 = yF$.

Para determinar las ecuaciones de flujo en cualquier punto genérico del módulo son:

$$NA = PeA \cdot (PF \cdot yR - PP \cdot yP) \quad \text{[Ecuación 23]}$$

$$NB = PeB \cdot (PF \cdot (1 - yR) - PP \cdot (1 - yP)) \quad \text{[Ecuación 24]}$$

Por último, para el cálculo de la composición del permeado en cualquier punto del módulo es:

$$yP = \frac{NA}{NA + NB} \quad \text{[Ecuación 25]}$$

2.4. Evaluación fase compresión del permeado

En cuanto al estudio del compresor (Luis Cañadas, 2021), es importante saber que se diferencian tres tipos de compresión. La primera de ellas es la adiabática que se da lugar cuando únicamente existe o se quiere dar un cambio en la presión (aumentarla), pero no se produce una transferencia de calor ($Q=0$) ni hacia el medio ni al sistema; la segunda es la isentrópica (proceso adiabático reversible) donde la entropía del fluido se mantiene permanente, pero en este caso no es un dato de estudio; y por último la politrópica donde se da una transferencia de energía tanto al interior como exterior del sistema. Este estudio aplica esta última, ya que la temperatura de salida por permeado es superior a la necesaria para su almacenamiento.

El trabajo se determina por la Ecuación 26:

$$W \left(\frac{Kj}{kmol} \right) = P1 \cdot \frac{n}{(n-1) \cdot \rho1} \cdot \left[\left(\frac{P2}{P1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad \text{[Ecuación 26]}$$

- W : energía específica (Kj/kmol)
- $P1$: presión de entrada al compresor (bar)
- $P2$: presión de salida del compresor (bar)
- $\rho1$: densidad de entrada al compresor (kg/m^3)
- n : índice politrópico

Siendo n el índice politrópico que toma valores según sea el gas, es decir, si este es monoatómico, el índice n es igual a 1,67; si es diatómico es igual a 1,4 y si es poliatómico (como es este estudio) equivale a 1,3.

Una vez determinado esta energía específica, hay que aplicarle un rendimiento ya que los compresores no tienen una eficacia del 100%, por tanto, mediante la ecuación 27 se determina:

$$WC = \frac{W}{\eta C} \quad \text{[Ecuación 27]}$$

- ηC : rendimiento que se aplica al compresor

Por último, para determinar la potencia se aplica la ecuación 28:

$$PC = \dot{m} \cdot WC \quad \text{[Ecuación 28]}$$

- \dot{m} : caudal másico de entrada al compresor (kg/h)
- PC : potencia compresor (Kw)

2.5. Evaluación estimación económica

Por otro lado, en cuanto al análisis económico (Haibo Zhai and Edward S. Rubin, 2011), se tiene en cuenta diferentes correlaciones para los datos obtenidos. En la siguiente Tabla 5, se muestra cada una de las ecuaciones:

Tabla 5. Correlaciones consideradas para realizar el análisis económico (Haibo Zhai and Edward S. Rubin, 2011)

Costes	Correlación
Membrana	$(A/2000)^{0,7} \cdot Cm \left(\frac{\$}{m^2}\right)$
Mantenimiento membrana	$0,01 \cdot Cm$
Módulo	$A \cdot Cmo \left(\frac{\$}{m^2}\right)$
Mantenimiento módulo	$0,01 \cdot Cm$
Electricidad (tanto del compresor como de la caldera)	$Ce \left(\frac{\$}{KWh}\right) \cdot W (KW) \cdot tiempo \left(\frac{KW}{h}\right)$

Con las siguientes correlaciones se realiza una estimación de lo que abarcaría este estudio. Cabe indicar que tanto la inversión del filtro, compresor y la de los dos intercambiadores como equipos, no forman parte del alcance de este estudio, por lo que no se incluyen correlaciones para su estimación.

Para determinar la amortización de la membrana y su módulo, se emplea las siguientes ecuaciones de las correlaciones de la Tabla 5:

$$Cm(\text{€}) = \left(\frac{A}{2000}\right)^{0,7} \cdot Cm\left(\frac{\text{€}}{m^2}\right) \quad [\text{Ecuación 29}]$$

$$Cmo(\text{€}) = A \cdot Cmo\left(\frac{\text{€}}{m^2}\right) \quad [\text{Ecuación 30}]$$

$$\text{Amortización} = (Cm + Cmo) \cdot \frac{2}{\text{Beneficio}\left(\frac{\text{€}}{\text{año}}\right)} \quad [\text{Ecuación 31}]$$

El coste de la membrana y su módulo se multiplica por dos debido a que habría dos membranas al tener dos calderas.

A continuación, se muestra en las Figura 30 - 32, algunas imágenes de datos tomados durante el estudio, junto de cómo y dónde se pretende extraer el CO₂, y cómo se encuentra almacenado.



Figura 30. Medidor y ajuste de presión inicial de CO₂



Figura 31. Características de caldera



Figura 32. Depósito de CO₂ junto con intercambiadores

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Modelo de Mezcla Perfecta

Los resultados obtenidos para el modelo de Mezcla Perfecta se presentan en la Figura 33. Para ello se aplican las ecuaciones propuestas con anterioridad.

1..10	Am [m ²]	y _R	y _P
Run 1	1	0,08984	0,4677
Run 2	35	0,08437	0,4669
Run 3	50	0,08189	0,4666
Run 4	75	0,07767	0,4661
Run 5	100	0,07334	0,4655
Run 6	150	0,0643	0,4643
Run 7	200	0,05472	0,4631
Run 8	250	0,04453	0,4618
Run 9	300	0,03367	0,4604
Run 10	310	0,0314	0,4601

Figura 33. Concentraciones de CO₂ en rechazo (y_R) y permeado (y_P) obtenidas en EES, para el modelo de Mezcla Perfecta.

En la Figura 33 se presentan los valores de la composición en volumen de CO₂ para la corriente de permeado, y_p, como la de rechazo, y_R, para un área de membrana, Am, determinada. Se observa como los valores de rechazo disminuyen conforme aumenta el área de membrana, ya que se captura mayor cantidad de CO₂ del efluente gas, y como la composición de permeado se mantiene prácticamente constante en un valor que no permitiría la recirculación.

3.2. Modelo Flujo Cruzado

En cuanto al modelo de flujo cruzado, los resultados de las concentraciones que tendremos en cuenta para la elección del modelo se reflejan en la siguiente (Figura 34):

1..10	1 A_1 [m ²]	2 y_P	3 y_R
Run 1	1	0,4677	0,08984
Run 2	35	0,4669	0,08438
Run 3	50	0,4666	0,08191
Run 4	75	0,4661	0,07772
Run 5	100	0,4655	0,07342
Run 6	150	0,4643	0,0645
Run 7	200	0,4631	0,05512
Run 8	250	0,4619	0,04522
Run 9	300	0,4605	0,03477
Run 10	310	0,4603	0,0326

Figura 34. Concentraciones de CO₂ en rechazo (y_R) y permeado (y_P) obtenidas en EES, para el modelo de Flujo Cruzado.

En cuanto al modelo de flujo cruzado, se observa en la Figura 34 una situación similar al modelo de mezcla perfecta para valores de composición de permeado, y_P , rechazo, y_R , y su área determinada A_m , es decir, a mayor área mayor retención y por tanto menor porcentaje en rechazo (cosa que entra dentro del objetivo), aunque la composición en rechazo es un poco mayor con respecto al de mezcla perfecta para un área mayor y por tanto de nuevo tampoco permitiría la recirculación.

3.3. Selección del modelo

En la Tabla 6 se toman los valores clave para determinar qué modelo sería el más preciso utilizar para el objetivo que se persigue en este trabajo. Para ello, se toma como modelo una membrana de área 150 m², valor tomado como dato intermedio entre los posibles valores de áreas de membranas.

Tabla 6. Composiciones de CO₂ para una membrana de 150 m². Valores tomados de las simulaciones correspondientes en EES.

COMPOSICIONES DE CO ₂		
Área membrana (m ²)	150	
Composición CO ₂ (% vol.)	Y_R	Y_P
Modelo MEZCLA PERFECTA	6,34	46,43
Modelo FLUJO CRUZADO	6,45	46,54

Para el cálculo de los datos anteriores se ha tomado como referencia la siguiente Figura 35, (Pasichnyk et al., 2023), donde queda reflejado los valores de permeancia del CO₂. Además, se ha elegido una membrana polimérica, es decir, dentro de los diferentes materiales que hay, es adecuado para este tipo de separación debido a su fácil preparación, producción barata a mayor escala y una amplia gama de aplicaciones. Es cierto que existe limitaciones prácticas debido a su naturaleza frágil y su rápido envejecimiento dando lugar a un menor rendimiento.

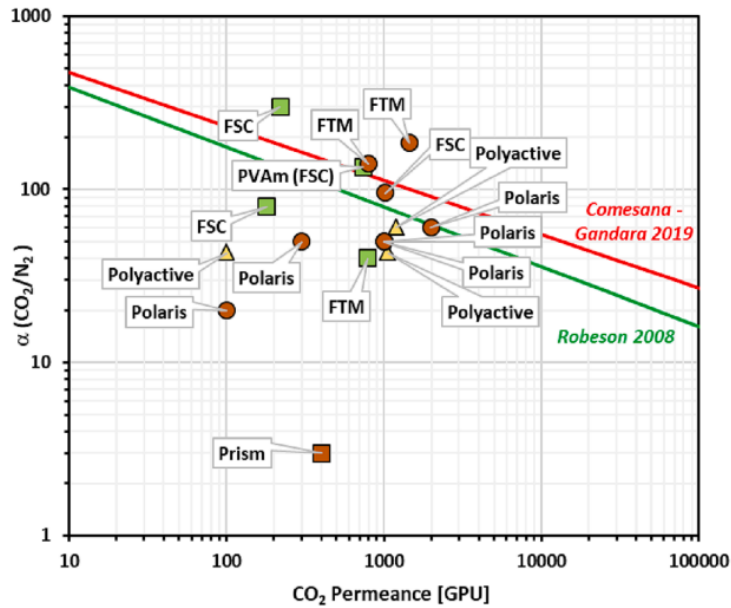


Figura 35. Valores de permeancia de CO_2 (Pasichnyk et al., 2023)

En esta Figura 35, también se muestra cada uno de los módulos estudiados para la separación de gases y cada imagen representa como es la membrana a emplear, es decir, si son fibras huecas, módulos envolventes, etc. En el estudio se toma un rango de 100 a 1000 de unidades de permeancia (GPU) en concreto de 800 GPU dando lugar al objetivo que se requiere, conseguir un 3 % v/v en la corriente de rechazo de la membrana.

En la siguiente Figura 36 y Figura 37, se determina lo siguiente:

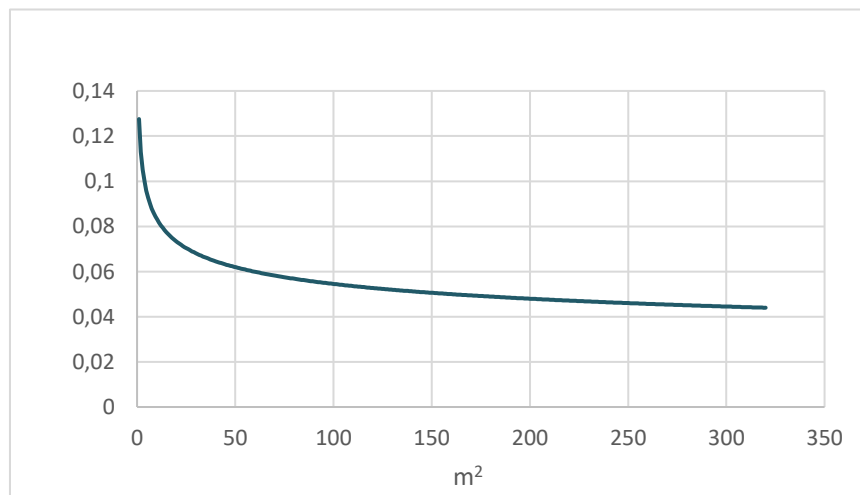


Figura 36. Valores de concentración en el rechazo (γ_R) de CO_2 , frente área de membrana en modelo de Mezcla Perfecta.

En esta primera Figura se observa cómo evoluciona lo comentado anteriormente, es decir, de manera decreciente se consigue llegar hasta un % de composición de rechazo de CO_2 de lo buscado cuando el área va en aumento.

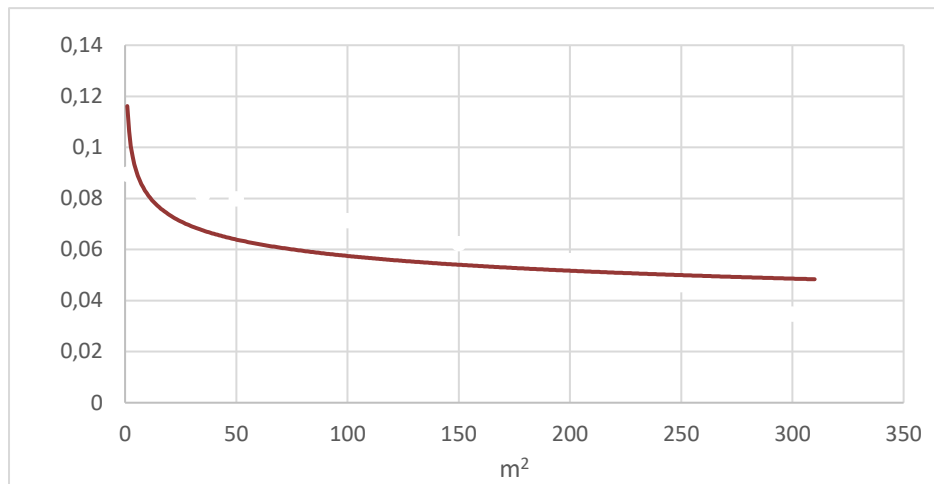


Figura 37. Valores de concentración en el rechazo de CO_2 frente área de membrana en FC

Ambas Figuras muestran las líneas de tendencia que siguen la concentración en volumen de rechazo de CO_2 frente al aumento de área y se determina que ambos modelos pueden ser válidos ya que en las soluciones recogidas aparece que ambas son capaces de llegar al porcentaje que se quiere tener a la salida de gases hacia el medio ambiente, es decir, en torno al 3% v/v. Por tanto, dependerá del módulo de membrana elegido, y en este estudio es de fibra huecas debido a que la inversión será inferior al módulo de haz en espiral, por lo que se determina el modelo de mezcla perfecta, ya que en la Figura 35, para el valor de permeancia elegido, se muestra que coincide con un módulo de fibras huecas.

La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos para el modelo de membrana seleccionado, donde P es la corriente de permeado en kmol/h, yR es la composición de CO_2 en la corriente de rechazo y NA y NB los flujos molares de CO_2 y NO_x respectivamente.

Se observa que el área de membrana para alcanzar un porcentaje de dióxido de carbono en torno al 3% vol. sería de 310 m². También hay que destacar que la cantidad de CO_2 no estaría en torno al 90%, aunque con la aplicación del filtro subiría más de lo calculado en la aplicación de EES, porcentaje exigido para poder recircular al proceso. Esto es debido a que, junto al CO_2 , se registran partículas de NO_x y otros compuestos, como vapor de agua, partículas sólidas PM_{10} , SO_2 , entre otros, que se han determinado únicamente en el cálculo de caudal de entrada en la membrana. Otro motivo sería que la membrana elegida no sea la correcta, lo cual hace que el rendimiento en su captura no sea óptimo. En este caso, una posible solución sería colocar una segunda membrana u otro módulo de membrana, para determinar si es por esa razón o no.

Tabla 7. Resultados obtenidos durante el estudio para el modelo de membrana seleccionado (modelo Mezcla Perfecta).

Area (m ²)	P (kmol/h)	y _R (%)	NA (kmol/m ² ·h)	NB (kmol/m ² ·h)
1	0,11	8,980	0,025	0,028
35	1,91	8,470	0,025	0,029
50	2,73	8,175	0,025	0,029
75	4,11	7,671	0,026	0,029
100	5,51	7,329	0,026	0,029
150	8,33	6,432	0,026	0,029
200	11,19	5,407	0,026	0,03
250	14,12	4,340	0,026	0,03
300	17,11	3,360	0,026	0,03
310	17,71	3,140	0,026	0,031

3.4. Estimación económica

En cuanto al análisis económico, los resultados obtenidos que se emplearán para este cálculo quedan reflejados en la siguiente Tabla 8 y Tabla 9, siendo C_m el coste de membrana medio, C_{mo} el coste medio de módulo, C_e el coste eléctrico (Haibo Zhai and Edward S. Rubin, 2011).

Tabla 8. Datos del estudio estimación económica (Programa EES)

Resultados	
PC (kW) caldera	4652
tiempo funcionamiento calderas (horas/año)	4.000
n índice politrópico	1,3
P (kg/s) caudal de permeado	0,13
P (kmol/h) caudal de permeado	17,71
P_C (KJ/kg) Potencia compresor	559,215
P_C (kW) Potencia compresor	103,85

Tabla 9. Resultados de costes totales (Programa EES)

Resultados	
Área (m ²)	310
Coste membrana (€)	58.729
Mantenimiento membrana (€)	587,3
Coste módulo (€)	14.105
Mantenimiento módulo (€)	141,05
Electricidad (€)	865.565

En la siguiente Tabla 9 se muestra los resultados obtenidos de las correlaciones anteriores (Tabla 5), junto con las ecuaciones 21 y factores de conversión. Anualmente, hay un coste elevado sobre todo en el ámbito eléctrico (865.565 €/año) y habría que ver si es rentable o no. Para ello, se realiza el estudio de posibles empresas capaces de comprar ese subproducto, dado que la corriente de permeado (17,71 kmol/h) no podría recircularse al proceso de producción, por contener un porcentaje de CO₂ inferior (64,41% v/v) al establecido en la normativa

alimentaria correspondiente.

En el estudio, se tiene que, se podría almacenar en torno a 2 millones de Kg CO₂/ año, junto con vapor de agua y algunos restos que hayan pasado tanto la membrana como el filtro, suponiendo que se consume todo el gas natural y que las calderas trabajan 4000 horas al año. Si se considera un peso molecular medio entre esos compuestos, principalmente CO₂ y vapor de agua, se tiene una densidad de 25,45 kg/m³ a -20 °C. (ya que es en estado líquido al que se encuentra para ser transportado). Suponiendo que al día se encuentran en funcionamiento durante 10 horas, se necesitan depósitos de 179,83 m³, aunque solo se podrían llenar entorno al 80% de su volumen por medidas de seguridad.(Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, n.d.)

Realizando los cálculos mediante factores de conversión, se obtienen 4.675,44 kg/ día de CO₂ en funcionamiento de la caldera (sabiendo que al día son 10 horas de funcionamiento de la caldera).

El precio del CO₂ (SENDECO2, n.d.) da lugar a que por día se puede ingresar unos 400€ diarios, siempre y cuando se tengan los diferentes distribuidores para este gas (Figura 38).

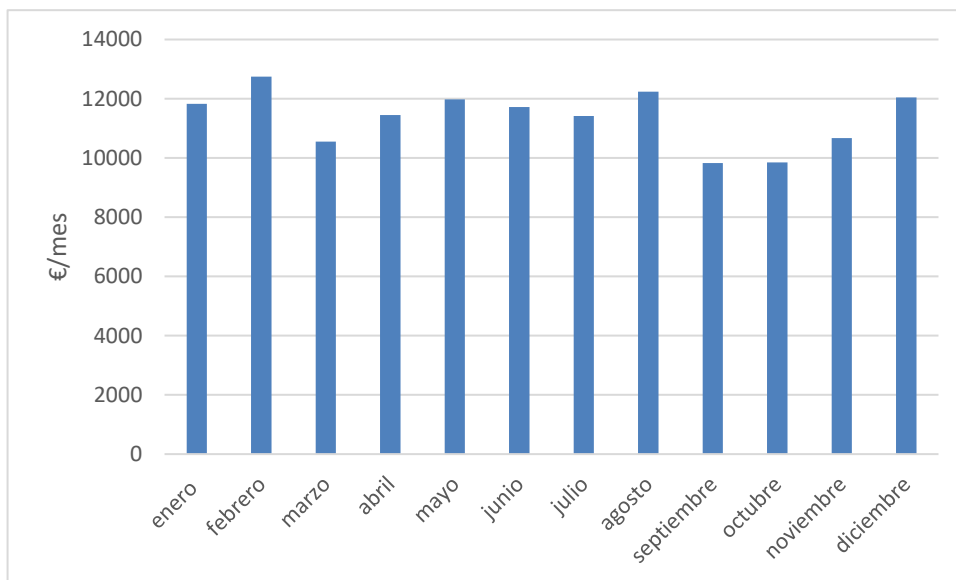


Figura 38. Predicción de los ingresos mensuales por venta de CO₂ alcanzados por la instalación

En la Figura 38 se destaca que una venta diaria de lo que se emite se podrá obtener un beneficio extra anual de 124.041 €, lo que da lugar a que se amortizaría el valor de la membrana y módulo en un año y tres meses de manera aproximada, pues se necesitaría adquirir dos membranas al haber dos calderas.

El cálculo de lo anterior sería el siguiente: se tiene un coste de membrana y módulo en conjunto de 72.834€, que multiplicado por 2, darían un costo total de 145.668€. A ello, se sabe que se obtiene un beneficio de 124.041€/año, por tanto, la división del costo total frente al posible beneficio nos daría 1,17 años de amortización (no incluyendo su mantenimiento). A esto habría sumarle el precio de intercambiadores y compresor que, como se nombra anteriormente, no es objeto en este estudio.

En la siguiente Figura 39 y 40 queda reflejado lo comentado anteriormente, es decir, la tendencia que sigue el

CO₂ en cuanto a emisiones junto con el beneficio que se puede obtener. Estas gráficas se han obtenido por una estimación aproximada de Excel de valores aleatorios.

En la primera Figura 39, se determina como a partir del precio máximo de CO₂ y la cantidad de emisiones del mismo, se ve como se manera constante se obtendría un beneficio ante la venta como subproducto de lo almacenado.

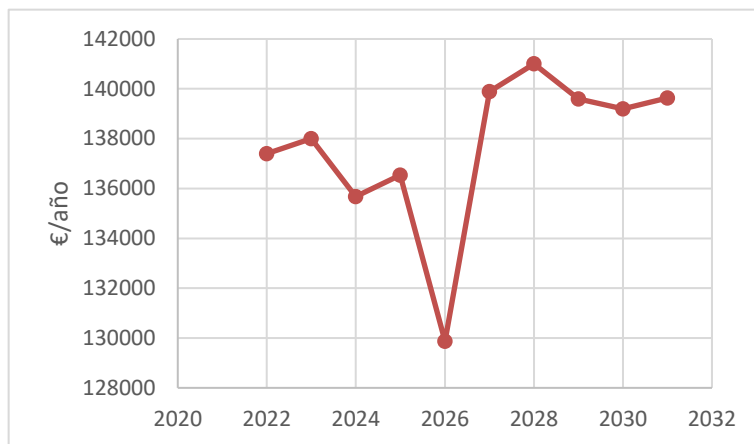


Figura 39. Análisis del beneficio estimado para la instalación por implantación del sistema de CO₂ propuesto

Con respecto a la Figura 40, las emisiones van a la baja de forma clara dando lugar a que, de manera gradual, se emitirá cada vez menos CO₂ al ambiente por la corriente de rechazo.

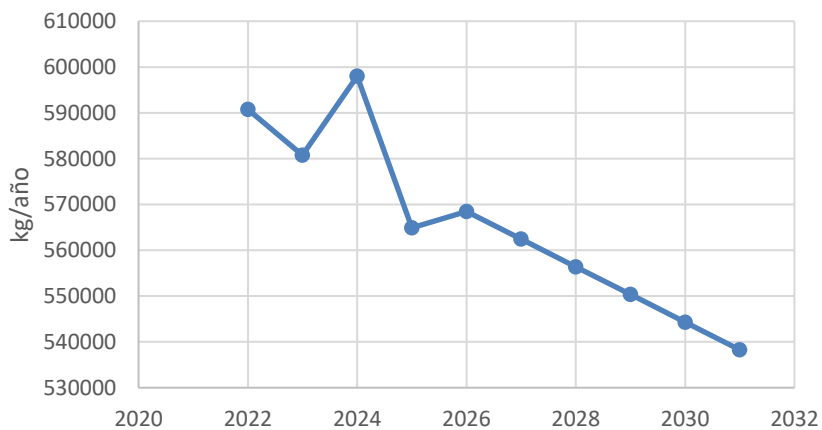


Figura 40. Tendencia de emisiones CO₂ tras la instalación de membrana

4. CONCLUSIÓN

Tras la realización de este estudio queda claro la relevancia de invertir en tecnologías de captura de CO₂. A través de la implantación de un sistema de captura postcombustión, se observa cómo se ven reducidas las emisiones de la empresa, como sería el caso de material particulado, NO_x entre otros, y más notablemente las de CO₂.

Considerando las necesidades y la información proporcionada por la empresa, se plantea un sistema de captura de CO₂ basado en membranas, debido en un primer aspecto al porcentaje de CO₂ que se tiene a la salida de la caldera, y en un segundo aspecto, es un sistema más económico (en la suma de demanda energética junto con mantenimiento del sistema de captura) en comparación con los restantes disponibles. Por este motivo, se plantea la instalación de dos tipos de membranas: mezcla perfecta (modelo de mezcla perfecta) y flujo pistón (modelo de flujo pistón).

Según los resultados obtenidos, en el modelo de mezcla perfecta se aprecia un porcentaje a la salida de CO₂ en el caudal de rechazo de 3,14% v/v, en comparación del modelo de flujo cruzado con un valor de 3,26% v/v. Es por ello dejan ver que la aplicación del modelo de mezcla perfecta alcanza un porcentaje de rechazo menor de CO₂ que el registrado inicialmente en el proceso, es decir, teníamos una salida de CO₂ con 9% v/v y se consigue una salida de 3% v/v, aunque el permeado obtenido no podría ser recirculado por no cumplir la normativa correspondiente, ya que según Real Decreto 1466/2009, de 18 de septiembre, por el que se establecen las normas de identidad y pureza de los aditivos alimentarios distintos de los colorantes y edulcorantes utilizados en los productos alimenticios, no puede ser menor al 99% de pureza, y este tendría un valor de 46,01% v/v proponiéndose por ello una solución como subproducto.

En cuanto al ámbito económico, se muestra un valor de coste de membranas y módulos de 145.668€ con un posible beneficio, suponiendo la mejor venta por tonelada, de 124.041€/año, lo que daría lugar a una amortización de un año y tres meses de manera aproximada.

El sector de los refrescos debe ser un sector considerado en la evaluación de emisiones y poner de su parte para la implantación de tecnologías de captura que ayuden, no sólo a reducir GEI, sino también a intentar ser pionero a escala industrial de los sistemas de captura. Aunque estos sectores se consideren minoritarios y no se tengan en consideración porque hay otros a nivel industrial que tienen mayor importancia, no hay que dejarlos de lado, ya que todos tienen un impacto en mayor o menor grado, sobre el medio ambiente.

Se debe hacer acto de conciencia entre todos y aunque suponga una inversión, a largo plazo se puede ver recompensada en lo económico, ambiental y político, y servir como ejemplo para empresas que no se atreven a dar el paso, ya que aún es posible dar un giro a esta preocupante situación.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Estatal BOE. (2011). *Real Decreto 650/2011, de 9 de mayo, por el que se aprueba la reglamentación técnico-sanitaria en materia de bebidas refrescantes.*
- Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. (n.d.). *Orden de 7 de noviembre de 1983 por la que se aprueba la Instrucción Técnica Complementaria MIE-AP-10 del Reglamento de Aparatos a Presión referente a depósitos criogénicos.*
- Alberto Valdivielso. (n.d.). *Efecto invernadero.*
- Anna Sheffer. (n.d.). *What exactly is the greenhouse effect?* Retrieved November 22, 2023, from <https://www.yahoo.com/lifestyle/exactly-greenhouse-effect-trump-doesn-175544973.html>
- Asociacion Española de Normalización y Certificación. (n.d.). *UNE-EN 14620-1:2008 Diseño y fabricación de tanques de acero cilíndricos, verticales y de fondo plano, construidos en el lugar de emplazamiento para el almacenamiento de gases licuados refrigerados con temperaturas de servicio entre 0 °C y -165 °C.*
- Baxter Larry L. (2009). *Cryogenic CO2 Capture as a Cost-Effective CO2 Capture Process.*
- Cámara, Á., Ramos, A., Fernández, J., Menéndez, E., Kindelán, J. M., Martínez, W., Del Potro, R., Del Olmo, C., Ramírez, P., Zapatero, M. Á., Querol, E., González, C., Conde, E., & Reina, P. (n.d.). *El futuro del carbón en la política energética española.*
- Chaofeng Li . (2022). *A Highly Compatible Phototrophic Community for Carbon-Negative Biosynthesis.*
- Drägerwerk AG & Co. KGaA. (n.d.). *Control fiable de CO2 en la industria de bebidas.*
- EPA Unites States Environmental Protection Agency. (n.d.). *Global Greenhouse Gas Emissions Data.*
- Eva López Mérida. (n.d.). *SIMULACIÓN DE LA CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO2) Y EVALUACION COMO AGREGADO DEL CEMENTO.*
- Fondo Monetario Internacional. (n.d.). *Graficas Crisis Guerra.*
- Global CCS Institute. (2016). *THE GLOBAL STATUS OF CCS / 2016.* 11–12.
- Haibo Zhai and Edward S. Rubin. (2011). *Technical and Economic Assessment of Membrane-based Systems for Capturing CO2 from Coal from Coal-fired Power Plants.* https://www.cmu.edu/epp/iecm/rubin/PDF%20files/2012/Zhai,%20Rubin_Membrane_2011%20AIChE%20Spring%20Mtg_3-13-11.pdf
- (IISD) International Institute for Sustainable Development. (n.d.). *Costo de procesos de captura.* Retrieved November 22, 2023, from <https://www.iisd.org/articles/deep-dive/why-carbon-capture-storage-cost-remains-high>

- Intersam. (2022). *Tipos de refrigeradores*. <https://intersam.es/tipos-gases-refrigerantes-caracteristicas/#:~:text=El%20amoniac%20y%20el%20di%20C3%B3xido,producir%20a%20partir%20de%201930>.
- J.D. Sealer/ Ernest J. Henley/ D. Keith Roper. (2011). *Separation Process Principles. Chemical and biochemical operations. 3 rd edition*. 500–568.
- López Fuentes, A. L. (n.d.). *Diseño y montaje de una instalación de laboratorio para la caracterización y desarrollo de absorbentes de CO2 basados en aminas*.
- Luis Cañadas. (2021). *Operaciones con Sólidos y Fluidos. Impulsión de Gases*.
- Maria del Carmen Clemente, & Julio Rodrigo Naharro. (n.d.). *COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO2 EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA*. Retrieved November 27, 2023, from chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://oa.upm.es/5097/2/INVE_MEM_2009_65690.pdf
- Mat, N. C., Lou, Y., & Lipscomb, G. G. (2014). Hollow fiber membrane modules. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 4, 18–24. <https://doi.org/10.1016/J.COCHE.2014.01.002>
- Ministerio de Agricultura, A. y M. A. (Fundación B. O. E. de C. C. A. E. de M. C. N. de E. A. (n.d.). *Cambio climático: Informe de Síntesis*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.unirioja.es/servicios/os/pdf/guia_sintesis_resumida_IPCC.pdf
- Mondal, M. K., Balsora, H. K., & Varshney, P. (2012). Progress and trends in CO2 capture/separation technologies: A review. *Energy*, 46(1), 431–441. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2012.08.006>
- Nelson Izaguirre. (2009). *Membrana haz en espiral*. Nelson Izaguirre
- Pasichnyk, M., Stanovsky, P., Polezhaev, P., Zach, B., Šyc, M., Bobák, M., Jansen, J. C., Přebyl, M., Bara, J. E., Friess, K., Havlica, J., Gin, D. L., Noble, R. D., & Izák, P. (2023). Membrane technology for challenging separations: Removal of CO2, SO2 and NOx from flue and waste gases. *Separation and Purification Technology*, 323, 124436. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2023.124436>
- Pedro Ollero de Castro. (2020). *Fundamentos De Las Operaciones de separación de Transferencia de masa (Nº1)*.
- Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes, P.-E. M. para la T. E. (n.d.). *Emisiones de REFRESCOS S.A.*
- Ritchie Hannah, Roser Max, & Rosado Pablo. (2020). *Emisiones de CO2 datos*. CO2 and Greenhouse Gas Emissions.
- SENDECO2. (n.d.). *Precio de tonelada CO2*.
- Sergio Hurtado Melo. (n.d.). *Anexo Filtro de Mangas. Universidad de Sevilla*.

- Shaftel Holly, Callery Susan Randal, Jackson Randal, & Bailey Daniel. (n.d.). *Causas del cambio climático*.
https://climate.nasa.gov/climate_resources/277/temperatura-vs-actividad-solar/
- Song, C., Liu, Q., Deng, S., Li, H., & Kitamura, Y. (2019). Cryogenic-based CO₂ capture technologies: State-of-the-art developments and current challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *101*, 265–278. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.11.018>
- Spigarelli, B. P., & Kawatra, S. K. (2013). Opportunities and challenges in carbon dioxide capture. *Journal of CO₂ Utilization*, *1*, 69–87. <https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2013.03.002>
- Wenzhao Zhang^a, Chenbin Ma^a, Haifeng Li^a, Liangyu Xuan^a, & Aimin An. (2022). *DMC-PID cascade control for MEA-based post-combustion CO₂ capture process*. 182.
- Zaman, M. & H. L. J. (2013). *Carbon capture from stationary power generation sources: A review of the current status of the technologies*.

6.ANEXO

"DATOS MODELO MEZCLA PERFECTA"

"A:CO2 y B:NOX"

F=0,036 [kmol/s]
 y_F=0,09
 PF=9 [bar]
 PP=1,2 [bar]
 Am=310 [m²]

"Permeabilidad kmol/(m²*s*bar) para ello tenemos la unidad de GPU que equivalen a 3,54*10⁽⁻⁸⁾
 [kmol/(m²*s*bar)]"

GPU=3,54*10⁽⁻⁸⁾
 PeA=800*GPU
 PeB=30*GPU

"Balance de materia"

F=P+R
 F*y_F=P*y_P+R*y_R

"Ecuaciones de Flujo"

NA=PeA*(PF*y_F-PP*y_P) "flujo de A en kmol/(m²*s) a través de la interfase"
 NB=PeB*(PF*(1-y_R)-PP*(1-y_P)) "flujo de B en kmol/(m²*s) a través de la interfase"
 y_P=NA/(NA+NB)
 Am=P/(NA+NB)

"DATOS MODELO DE FLUJO CRUZADO"

"A:CO2 y B:NOX"

F=0,036 [kmol/s]
 y_F=0,09
 PF=9 [bar]
 PP=1,2 [bar]
 A_1=150 [m²]

"Permeabilidad $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{bar})$ para ell

o tenemos la unidad de barrer que equivalen a $3,54 \cdot 10^{-8} \text{ [kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{bar}]$ "

$$\text{GPU} = 3,54 \cdot 10^{-8}$$

$$\text{PeA} = 800 \cdot \text{GPU}$$

$$\text{PeB} = 30 \cdot \text{GPU}$$

"Balance de materia"

$$F = P + R$$

$$F \cdot y_F = P \cdot y_P + R \cdot y_R$$

"Ecuaciones de Flujo"

$$N_A = \text{PeA} \cdot (P \cdot y_F - P \cdot y_P)$$

interfase"

"flujo de A en $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ a través de la

$$N_B = \text{PeB} \cdot (P \cdot (1 - y_R) - P \cdot (1 - y_P))$$

interfase"

"flujo de B en $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ a través de la

$$R_1 = -(N_A + N_B)$$

" derivada dR/dA_m "

$$R = F + \int R_1; A_m; 0; A_1$$

$$y_{R_1} = 1/R \cdot (y_R \cdot (N_A + N_B) - N_A)$$

" derivada dy_R/dA_m "

$$y_R = y_F + \int y_{R_1}; A_m; 0; A_1$$

$$\{y_P = N_A / (N_A + N_B)\}$$

