

Procesos de separación basados en membranas para captura de CO₂: una vigilancia tecnológica.

Angela Jazbleiddy Muñoz Lizcano y Jessica Yuliana Suarez Celis

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Químico

Director

Omar Andrés Benavides Prada

Ingeniero químico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Dedico este logro, en primer lugar, a Dios, por haberme guiado en cada etapa de este proceso, por darme claridad en los momentos de incertidumbre y fortaleza cuando sentí que no podía continuar.

A Liliana Lizcano, José Muñoz y a mi segunda mamá, Yeni Arrieta, quienes me enseñaron, con su ejemplo, a no rendirme ante las adversidades.

A mis hermanos, por ser mi motor y mi inspiración constante.

Y, con especial cariño, a “Guffi”, mi compañero incondicional, que ha estado a mi lado en cada noche de desvelo desde que llegó a mi vida.

Este logro no es solo mío; también les pertenece a ustedes. Gracias por acompañarme en este camino.

Angela Muñoz

Dedicatoria

A mi tía Andrea, quien con amor incondicional y un ejemplo de vida firme, transparente y valiente, me acompañó y guio a lo largo de este camino. Mujer de trabajo incansable y honestidad intachable, has sido luz y sostén en cada paso.

A mi Nino, cuyo brillo me abrió los ojos a un mundo creativo lleno de música y arte. Un guardián silencioso que ha estado presente en cada paso, inspirándome a mirar la vida con sensibilidad y pasión.

A mi Nona Flor, mi ángel eterno. Aunque ya no estés físicamente, tu luz sigue viva en mí. Me enseñaste el valor de la bondad, el optimismo, y la superación con humildad. Eres y serás siempre mi mayor ejemplo de fortaleza.

A Daniel, mi compañero de vida, cuyo amor transparente y generoso ha sido faro en los momentos de oscuridad y calma en medio del caos. Tu presencia ha sido más que compañía: ha significado crecimiento, apoyo y refugio.

A todos aquellos profesores que, con su dedicación y sabiduría, marcaron mi camino académico. Gracias por cada enseñanza y por el tiempo compartido, que ha dejado huella en mi formación.

A Cathalina y Andrey, amigos entrañables que, con la fuerza de la verdadera amistad, me acompañaron en esta montaña rusa que es la vida. Sus risas, compañía y momentos compartidos hicieron de estos años una etapa inolvidable.

Y a mí, por la entrega, la constancia y la valentía de seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Por no rendirme y creer en este camino como una forma de crecer, aprender y honrar todo lo que me inspira.

Jessica Suárez

Agradecimientos

Al culminar esta etapa tan significativa, quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que, de una u otra manera, hicieron posible la realización de este trabajo de grado.

En primer lugar, agradezco a Dios, por darme la fortaleza, sabiduría y serenidad necesarias para superar cada desafío durante este proceso.

A mi familia y amigos del Centro, por su amor incondicional, por estar siempre presente con palabras de ánimo, abrazos oportunos y confianza absoluta en mí. Gracias por acompañarme, sostenerme y creer en mi capacidad incluso en los momentos más inciertos.

A mi mamá, Liliana, quien fue testigo de cada uno de mis esfuerzos y luchas por alcanzar este sueño. Gracias por incluirme en tus oraciones cada noche, por ser mi inspiración y mi mayor sostén en cualquier circunstancia, por tu paciencia y tu apoyo inquebrantable. Este logro también es tuyo.

A mi segunda mamá, Yeni, gracias por escucharme, aconsejarme y guiarme en los momentos más nublados.

Agradezco a mi directora de trabajo de grado, Omar Andrés Benavides, por los llamados de atención, por su guía, compromiso y disposición constante para orientar este proceso con profesionalismo y exigencia académica.

A Elkin, gracias por estar desde el inicio de esta travesía, por ser mi apoyo emocional en cada etapa y por continuar acompañándome a pesar de todo con paciencia y cariño.

Y finalmente, a mi fiel compañero de desvelos, “Guffi”, mi perrito, mi bebé perruno, que llegó a mi vida en el momento perfecto para acompañarme e inspirarme en cada noche de desvelo, quien con su ternura y compañía me brindó paz y alegría en los momentos más difíciles.

A todos ustedes, gracias por hacer parte de este logro. Sin su presencia y apoyo, este camino habría sido mucho más difícil.

Angela Muñoz

Agradecimientos

Este trabajo es el resultado no solo de esfuerzo académico, sino también del amor, la compañía y el apoyo de personas que han sido fundamentales en mi vida y en este camino de formación.

A mi tía Andrea, por ser guía, ejemplo y sostén. Su amor incondicional, su transparencia, su valentía y su incansable dedicación me inspiraron en cada paso de este proceso.

A mi Nino, por abrirme los ojos a un mundo lleno de arte, música y creatividad, y por ser el responsable de mi carácter, de mis habilidades.

A mi Nona Flor, mi ángel eterno, que con su amor y valores sembró en mí una actitud optimista y un profundo sentido de superación. Su recuerdo me acompaña con fuerza y ternura, dándome aliento incluso en la distancia.

A todos los profesores que formaron parte de este recorrido, quienes con su conocimiento, vocación y guía marcaron mi vida y aportaron de manera invaluable a mi crecimiento académico y personal.

A Cathalina y Andrey, por ser mis cómplices en esta travesía, por su amistad incondicional y por acompañarme con risas, comprensión y momentos inolvidables. Ustedes han hecho que los desafíos fueran más llevaderos y los momentos de alegría, aún más especiales.

A Daniel, por su amor transparente, por nutrir mi espíritu y estar presente con paciencia, comprensión y fortaleza. Su apoyo ha sido crucial para superar los desafíos y avanzar con confianza y esperanza.

A todos ustedes, gracias por ser parte de este logro. Esta tesis también les pertenece.

Jessica Suárez

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	2
Estado del arte.....	4
1. Objetivos.....	6
1.1 Objetivo general.....	6
1.2 Objetivos específicos	6
2. Metodología	7
2.1 Formulación de ecuación de búsqueda, elección de bases de datos y selección de la información.	7
2.2 Organización de documentos y análisis bibliométrico	9
2.3 Identificación de avances y desafíos.....	10
3. Resultados y discusión	11
3.1 Ecuaciones de búsqueda: resultados protocolo PRISMA.....	11
3.2 Análisis bibliométrico.....	12
3.3 Tipos de membranas	16
3.3.1 Membranas poliméricas	18
3.3.2 Membranas inorgánicas	21
3.3.3 Membranas compuestas o híbridas.....	24
3.3.4 Membranas líquidas.....	26
3.3.5 Membranas iónicas o electroquímicas	30
3.4 Patentes Registradas de Membranas para la Captura de CO ₂	33
3.5 Análisis TRL.....	35
4. Conclusiones	38
Referencias bibliográficas	40

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Criterios de inclusión y exclusión.	8
Tabla 2 Criterios de búsqueda y filtros aplicados.	9
Tabla 3 Ecuación y resultados obtenidos por cada plataforma de búsqueda.	11
Tabla 4 Número de publicaciones por año en cada base de datos.....	14
Tabla 5 Principales sitios de publicación sobre membranas para la captura de CO ₂	14
Tabla 6 Revistas más citadas sobre el uso de membranas para la captura del CO ₂	16
Tabla 7 Características y Desempeño de Membranas poliméricas en la Captura de CO ₂	19
Tabla 8 Características y Desempeño de Membranas inorgánicas en la Captura de CO ₂	22
Tabla 9 Características y Desempeño de Membranas compuestas en la Captura de CO ₂	25
Tabla 10 Características y Desempeño de Membranas líquidas en la Captura de CO ₂	27
Tabla 11 Características y Desempeño de Membranas iónicas en la Captura de CO ₂	31
Tabla 12 Niveles de madurez de proyectos de investigación.	36

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Diagrama metodológico.	7
Figura 2 Diagrama de flujo del método PRISMA.	12
Figura 3 Mapa sobre la relación entre palabras clave de los artículos seleccionados realizado en Vosviewer.	15
Figura 4 Distribución según el tipo de membrana	17
Figura 5 Membrana polimérica semipermeable en espiral	18
Figura 6 Estructura de un elemento tubular cerámico	21
Figura 7 Ilustración de membranas compuestas Pebax/PEI-ZIF-8	24
Figura 8 Procesos de preparación de membrana de líquido iónico soportado por CO ₂ supercrítico. Método de deposición.	29
Figura 9 Dispositivo de absorción de gas.	30

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Membranas poliméricas	71
Apéndice B. Membranas inorgánicas.....	74
Apéndice C. Membranas compuestas o híbridas.	77
Apéndice D. Membranas líquidas.	83
Apéndice E. Comparación de membranas	85

Glosario

Barrer: unidad de medida utilizada para expresar la permeabilidad de gases a través de una membrana. Se define como $1 \text{ Barrer} = 10^{-10} \times \left(\frac{\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg}} \right)$. Se emplea en estudios de separación de gases, incluyendo la captura de CO₂ con membranas.

BPA (Bisfenol A): compuesto químico utilizado para la fabricación de resinas epoxi.

CFA-1: marco organometálico (MOF) con alta capacidad de absorción y estabilidad estructural.

CMC (Carboximetil Celulosa): polímero hidrofílico derivado de la celulosa utilizado en membranas para mejorar su estabilidad y permeabilidad.

COFs (Covalent Organic Frameworks): materiales orgánicos cristalinos y porosos contruidos por enlaces covalentes, usados en separación de gases por su alta selectividad.

Fouling: ensuciamiento de membranas causado por la deposición de partículas, aceites o contaminantes, reduciendo su eficiencia y vida útil.

GLMC (Graphene-Like Membrane Composite): material compuesto que combina propiedades del grafeno con otras matrices poliméricas, mejorando la selectividad en la captura de CO₂.

GPU (Gas Permeation Unit): unidad utilizada para expresar la permeabilidad de gases, donde $1 \text{ GPU} = 10^{-6} \frac{\text{cm}^3(\text{STP})}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg}}$.

Lantánidos: grupo de elementos químicos que se utilizan en catalizadores, imanes, baterías, fósforos y en la fabricación de membranas para la captura de CO₂.

Matrimid: polieterimida termoplástica con alta resistencia a la corrosión química, utilizada en membranas de separación de gases debido a su alta permeabilidad.

MMMs (Mixed Matrix Membranes): membranas híbridas que combinan materiales inorgánicos, mejorando la selectividad en proceso de captura de CO_2 .

MOF 808: material prometedor de la familia de MOFs a base de zirconio, conocida por su estabilidad y afinidad con el CO_2 .

MOF UIO-66- $(OH)_2$: es un material híbrido nanoestructurado, lo que incrementa su capacidad de absorción y estabilidad térmica en la separación de CO_2 .

MOFs (Metal-Organic Frameworks): estructuras metal-orgánicas porosas formadas por iones metálicos y ligandos orgánicos.

MXene: derivados de carbonos y nitrógenos de metales de transición bidimensionales, que se utilizan como electrodos y lubricantes, altamente conductores con una superficie hidrofílica y potencial de separación de CO_2 .

Oligómeros PEAs (Polietarminas): compuestos con estructuras flexibles y reactivas, utilizados en las síntesis de membranas para mejorar la estabilidad.

Oligómeros SIT: materiales con propiedades específicas de reticulaciones, empleados en membranas por su alta selectividad.

PEAs (Polietaraminas): poliéster alifático, biodegradable a través de una variedad de mecanismos con grupos funcionales amina, utilizados en modificación de membranas para mejorar su afinidad con CO_2 .

Pebax: copolimero negro compuesto por segmentos de poliamida y polieter, conocido por su flexibilidad y aplicación en membranas de separación de CO_2 .

Pebax 1657: es un elastómero termoplástico de poliéster flexible (60 %) y poliamida rígida (40 %), con buena resistencia mecánica y estabilidad térmica.

Pebax 2533: variante del Pebax con una mayor proporción de poliéter, con mayor flexibilidad y permeabilidad.

PEGDMA (Polietilenglicol dimetacrilato): monomero utilizado en la síntesis de polímeros de red cruzada, ayuda a mejorar la estabilidad estructural en membranas.

PEI (Polieterimida): polímero termoplástico con elevada eficiencia mecánica, con excelente resistencia térmica y a sustancias químicas. Utilizada en membranas para la separación de gases debido a su compatibilidad con rellenos inorgánicos como MOFs y COFs.

PEO (Polietileno óxido): también conocido como polietilenglicol (PEG), es un poliéter sintético, hidrófilo y biocompatible, utilizado en membranas para mejorar la selectividad y la estabilidad química.

PES (Poliéter sulfonas): polímero termoplástico con alta resistencia térmica, química y mecánica. Utilizado en la fabricación de membranas para separación de gases debido a su estabilidad y compatibilidad con rellenos inorgánicos.

PIM-1 (Polímero de intrínseca porosidad 1: material polimérico altamente microporoso utilizado en membranas para la separación de gases.

PPM (Partes por millón): unidad de medida utilizada para expresar la concentración de una mezcla en una sustancia.

PSF (Polisulfona): polímero de sulfona aromático de alta resistencia y resistente a altas temperaturas.

PTFE (Politetrafluoroetileno): más conocido como teflón, polímero similar al polietileno, altamente insertado y resistente a productos químicos, utilizado en membranas para evitar la absorción de contaminantes.

PTMSP (Poli(1-trimetilsilil-1-propino)): polímero con estructura microporosa con alta permeabilidad al CO_2 en membranas de separación.

PVAm (Polivinilamina): polímero con estructura básica, formado por unidades de vinilamina y acetato de vinilo. Con alta afinidad por el CO_2 , utilizado en membranas por su alta capacidad de formación de enlaces de hidrógeno.

PVDF (Polifluoruro de vinilideno): es un fluoropolímero termoplástico altamente inerte químicamente, utilizado en membranas de filtración y separación de gases.

SLIM (*Supported Ionic Liquid Membrane*): membranas que utilizan líquidos iónicos como medio selectivo para la separación de gases, mejorando la estabilidad y eficiencia operativa.

SPEEK (Sulfona de polieteretercetona): polímero sulfonado utilizado en membranas de intercambio iónico.

Teaching Analytics: área de la analítica de aprendizaje enfocada en el análisis de datos educativos para mejorar los procesos de enseñanza, optimizando metodologías y herramientas para mejorar el desempeño del docente y el aprendizaje del estudiante.

Torlon: nombre comercial de poliamida-imida (PAI), termoplástico eficaz, transformable en caliente, utilizado en membranas de separación de gases y en aplicaciones de alta exigencia térmica e industrial.

Zeolita CHA: la chabazita es una zeolita natural, utilizada en separación de gases debido a su porosidad y estabilidad térmica.

Zeolita SSZ-13: zeolita en polvo, utilizada principalmente para la purificación, eliminación de NO_x en los gases y también en procesos de adsorción.

ZIF-67: estructura metal orgánica, con excelente estabilidad térmica y química, utilizado en membranas híbridas para mejorar la separación de CO_2 .

ZIF-7: estructura zeolítica de imidazol, subclase de los MOFs los cuales tienen mayor área superficial que las zeolitas, alta estabilidad térmica, hidrotérmica y química que la mayoría de los MOFs.

ZIF-8: compuesto metal orgánico (MOF) que presenta una estructura conformada por nano-esferas que actúan como encapsulante de moléculas pequeñas que se absorben individualmente. Conocido por su alta estabilidad y selectividad en la adsorción de CO_2 .

Resumen

Título: Procesos de separación basados en membranas para captura de CO₂: una vigilancia tecnológica.

Autores: Benavides Prada Omar Andrés, Angela Jazbleiddy Muñoz Lizcano, Jessica Yuliana Suarez Celis

Palabras clave: Dióxido de carbono, membranas, separación, captura.

Descripción: Esta revisión sistemática tuvo como objetivo analizar los procesos de separación de CO₂ basados en membranas, mediante la implementación del protocolo PRISMA. Esto permitió establecer criterios rigurosos de selección, clasificación y análisis de la información científica disponible. Se desarrolló un análisis bibliométrico sobre los avances tecnológicos en este campo, identificando tendencias de investigación y desafíos actuales para su implementación. Los resultados revelaron diversos tipos de membranas para la captura de CO₂, incluyendo poliméricas, inorgánicas, híbridas, iónicas y líquidas, cada una con características y rendimientos específicos. Se encontró que las membranas híbridas, que combinan polímeros con materiales inorgánicos como estructuras metal-orgánicas (MOFs) y estructuras orgánicas covalentes (COFs), han demostrado mejoras significativas en selectividad y permeabilidad. A pesar de estos avances, persisten importantes desafíos como la estabilidad a largo plazo, los elevados costos de producción y la adaptabilidad a condiciones industriales reales. Esta revisión proporciona una visión del estado actual de la tecnología de membranas para captura de CO₂, contribuyendo a la identificación de áreas prioritarias para investigaciones futuras y al desarrollo de soluciones más eficientes para la mitigación del cambio climático.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería química. Director: Omar Andrés Benavides Prada. Ingeniero químico.

Abstract

Title: Separation processes based on membranes for CO₂ capture: a technological surveillance.

Authors: Benavides Prada Omar Andrés, Angela Jazbleiddy Muñoz Lizcano, Jessica Yuliana Suarez Celis

Keywords: Carbon dioxide, membranes, separation, capture.

Description: This systematic review aimed to analyze membrane-based CO₂ separation processes by implementing the PRISMA protocol. This allowed the establishment of rigorous criteria for selection, classification and analysis of the available scientific information. A bibliometric analysis of the technological advances in this field was developed, identifying research trends and current challenges for their implementation. The results revealed several types of membranes for CO₂ capture, including polymeric, inorganic, hybrid, ionic and liquid, each with specific characteristics and performance. Hybrid membranes, which combine polymers with inorganic materials such as metal-organic frameworks (MOFs) and covalent organic frameworks (COFs), were found to have demonstrated significant improvements in selectivity and permeability. Despite these advances, important challenges remain, such as long-term stability, high production costs and adaptability to real industrial conditions. This review provides an overview of the current status of membrane technology for CO₂ capture, contributing to the identification of priority areas for future research and the development of more efficient solutions for climate change mitigation.

* Degree Work

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería química. Director: Omar Andrés Benavides Prada. Ingeniero químico.

Introducción

El dióxido de carbono es uno de los principales responsables del calentamiento global, siendo el segundo en importancia después del vapor del agua; proviene, principalmente, de actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, la industria petrolera, el transporte, la deforestación y la quema de biomasa (Smith et al., 2015). Sin embargo, en condiciones naturales, tanto el CO₂ como el vapor de agua son esenciales para mantener la temperatura de la tierra, ya que sin ellos la temperatura promedio sería de -18 °C (Hartmann et al., 2013). No obstante, en las últimas décadas las emisiones de CO₂ han aumentado significativamente, con un incremento global del 59 % en los últimos 20 años (Le Quéré et al., 2018). Esto ha provocado fenómenos climáticos extremos, tales como sequías prolongadas, pérdida acelerada de glaciares e incendios forestales. Actualmente, más de 36.000 millones de toneladas de CO₂ se liberan al año, alcanzando en 2020 una concentración de 413,2 partes por millón (ppm) en la atmósfera (Global Carbon Project 2020).

Dada la significativa problemática que se presenta a nivel mundial, se han desarrollado diversas tecnologías basadas en métodos físicos o químicos para mitigar las emisiones de CO₂. Entre estas, las membranas surgen como una opción prometedora y potencialmente competitiva, debido a su capacidad de permitir que el CO₂ las atraviese mucho más rápido que los demás componentes del gas mixto, obteniendo un permeado con alta concentración de CO₂. La separación por membranas funciona utilizando barreras semipermeables para separar gases según sus características físicas y químicas, brindando ventajas significativas como el bajo requerimiento energético y menor impacto ambiental, lo que ha logrado llamar la atención en comparación con métodos como la absorción y adsorción (Sanders et al., 2013). Además, se han desarrollado investigaciones y avances que permiten optimizar el uso de membranas, mejorando la selectividad y permeabilidad. (Koros & Zhang, 2017).

En este contexto, en el presente trabajo, a través del análisis de estudios recientes, se identifican avances relevantes en materiales, técnicas de separación y desempeño de las membranas, así como los desafíos aún presentes en el desarrollo de dicha tecnología para la captura de CO_2 , en términos de selectividad, estabilidad y costos operativos. Esta revisión ayudará a orientar las investigaciones hacia áreas como el desarrollo de nuevas membranas, optimización de procesos y los costos de su implementación a escala industrial, proporcionando una base para futuros trabajos que promuevan la eficiencia en la captura de CO_2 por medio de membranas. Con ello, se busca contribuir al desarrollo de soluciones más eficientes y sostenibles para la reducción de emisiones, siendo este un punto clave en la lucha contra el cambio climático.

Estado del arte

Según lo establecido por la *UNAV (2020)*, una revisión sistemática representa un enfoque científico específico donde se reúne exhaustivamente toda la información derivada de investigadores sobre un tema o pregunta en particular, con el fin de ofrecer una síntesis íntegra y objetiva de diversos estudios pertinentes, recopilado en un único documento y haciendo un uso de técnicas o métodos, entre los cuales se definen parámetros de inclusión y exclusión, la búsqueda sistemática de la literatura, extracción y análisis de datos. Por otra parte, el protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) consiste en una metodología estandarizada para la elaboración de revisiones sistemáticas y metaanálisis, con directrices definidas que buscan transparencia y calidad óptima de los informes, según lo estipulado por *Liberati, et al (2009)*.

Campos Rodriguez, et al. (2021) realizaron una revisión sistemática sobre avances, ventajas y desventajas de nanomateriales en el tratamiento de aguas residuales. Usaron el protocolo PRISMA partiendo de la pregunta de investigación, selección de palabras claves y motores de búsqueda. Definieron criterios de inclusión y exclusión, enfocados en artículos científicos que presentaran un análisis cuantitativo o un estudio desarrollado previo al 2010. De igual manera, *Valencia Arias, et al. (2023)* desarrollaron una revisión con el objetivo de examinar los diferentes factores que influyen en la inclusión de tecnologías verdes en el sector industrial. Fue posible por medio de PRISMA analizar y recopilar información de alta confiabilidad de hasta 123 documentos, de los cuales se pudo determinar que entre los factores más recurrentes en la adopción de dichas tecnologías se encuentran los incentivos por parte de los gobiernos, el seguimiento de normas ambientales, asociado a la presión que puede ejercer la localidad aledaña, y, en muchos casos, la disminución de los costos operativos. Así mismo, *Pérez Hernández (2024)* estableció una ruta

basada en las directrices del método PRISMA, con el fin de asegurar la calidad en la recopilación y análisis de estudios sobre bioplásticos a base de almidón. Su investigación confirmó que estos materiales poseen propiedades mecánicas y biodegradables prometedoras para la fabricación de empaques; sin embargo, su baja resistencia al agua y estabilidad térmica siguen siendo desafíos, lo que hace necesario optimizarlos mediante la incorporación de plastificantes y refuerzos poliméricos.

Por otro lado, según lo establecido por diferentes revisiones y estudios enfocados en captura de CO₂, *Puentes Quiroz, et al. (2024)* establecen que la aplicación de membranas en el proceso representa un bajo consumo energético, además de poseer una capacidad de operación a temperatura ambiente o moderada, significando menores costos en comparación con otros métodos. Según *Wu et al. (2022)*, las membranas de polímero de alta permeabilidad, como las basadas en polieterimida (PEI), han mostrado un rendimiento prometedor, pero su selectividad frente al CO₂ es aún inferior al de otros materiales. En contraste, las membranas inorgánicas, como las de zeolitas o silicatos de aluminio, presentan una mejor selectividad, aunque con menores tasas de permeabilidad (*Zhao et al., 2021*). Así mismo, uno de los mayores obstáculos es la estabilidad térmica de las membranas en ambientes industriales, donde las fluctuaciones de temperatura pueden afectar negativamente su rendimiento (*Baker & Lokhandwala, 2020*). Además, la resistencia al *fouling* (obstrucción por contaminantes) sigue siendo un problema importante, especialmente en aplicaciones industriales con gases de composición variable (*Lu et al., 2022*).

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Elaborar una revisión sistemática de procesos de separación de CO₂ basados en membranas.

1.2 Objetivos específicos

Implementar el protocolo PRISMA para fijar criterios de selección, clasificación y análisis de la información.

Desarrollar un análisis bibliométrico sobre los avances tecnológicos en procesos de separación por membranas para captura de CO₂.

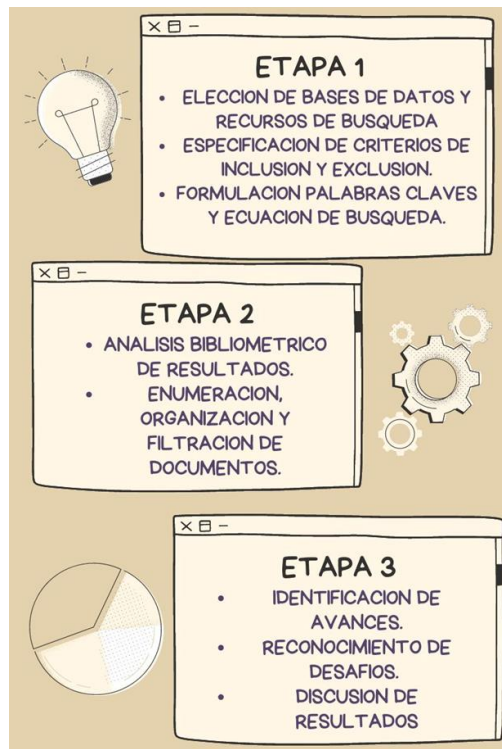
Identificar los desafíos actuales para la implementación de técnicas de captura de CO₂ basadas en membranas.

2. Metodología

En la Figura 1 se observa el diagrama metodológico empleado para llevar a cabo la revisión sistemática.

Figura 1

Diagrama metodológico.



2.1 Formulación de ecuación de búsqueda, elección de bases de datos y selección de la información.

Se seleccionaron Web of Science (WOS) y Scopus porque en estas se encuentran diferentes bases de datos relevantes como *Taylor & Francis*, *ACS Publications*, *Science Direct* y *Springer*.

Adicionalmente a esto, son plataformas de fácil acceso y licenciadas para los estudiantes de la Universidad Industrial de Santander, lo que facilita la investigación.

Para la formulación de la ecuación de búsqueda, se inició con la pregunta de esta investigación “¿Cuáles son las membranas óptimas para la separación y captura de CO₂?”. A partir de esto, se seleccionaron términos claves como *separation*, *carbon dioxide*, *membranes* y *capture*, junto con sus respectivos sinónimos, cada una de ellas conectadas mediante los operadores OR y AND. Esta ecuación se aplicó de manera uniforme en las bases de datos, realizando la búsqueda por el título, palabras clave y resumen. En la Tabla 1 se presentan los criterios de inclusión y exclusión utilizados para la revisión sistemática según el protocolo PRISMA.

Tabla 1

Criterios de inclusión y exclusión.

CRITERIO	INCLUSIÓN	EXCLUSIÓN
Relevancia temática	Estudios enfocados en la captura de CO ₂ por medio de membranas.	Estudios no enfocados específicamente en membranas como proceso de captación del CO ₂ .
Tipo de documento	Artículos respaldados científicamente.	Artículos de opinión y documentación extraída de fuentes no confiables.
Actualidad	Documentos comprendidos entre el año 2021 a la actualidad.	Información previa al año 2021 (a excepción que sean seminales o relevantes para el contexto).
Origen	Direccionado a países con registros de alta contaminación (China y EEUU)	Fuentes de países diferentes a China y EEUU.
Idioma	Inglés y/o español.	Artículos en idiomas que no sea posible su comprensión o traducción confiables.

2.2 Organización de documentos y análisis bibliométrico

El comienzo de la búsqueda de información se realizó el día 8 de octubre de 2024, en donde se encontraron 4661 y 2809 documentos relacionados en WOS y Scopus, respectivamente. Tras aplicar los filtros detallados en la Tabla 2, se obtuvo un resultado final de 122 documentos en WOS y 232 documentos en Scopus.

Tabla 2

Criterios de búsqueda y filtros aplicados.

CRITERIO	CRITERIO APLICADO	WOS	SCOPUS
Búsqueda inicial	Ecuación de búsqueda	4661	2809
Tipo de documento	Artículo	548	1931
Idioma	Inglés y español, debido a que la traducción desde otros idiomas puede resultar poco confiable.	534	1838
País/Región	China y EEUU debido a que son los países que más contaminan a nivel mundial.	244	930
Fecha	Se utilizó un rango de 5 años (2021-2025)	203	829
Categoría	Engineering chemical, engineering environmental, environmental Science	154	427
Título de publicación	Excluir: revistas y temas no relacionados	122	232

Según *Datosmacro.com* (2024), entre los países más contaminantes se encuentra liderando las emisiones de CO₂ anualmente China, con 13.259.639 millones de toneladas, seguida de Estados Unidos con 4.682.039 millones de toneladas, siendo estos los países con mayor número de publicaciones relacionadas al tema, con un total de 274 y 86 documentos respectivamente. Por esta razón, se tomó la decisión de incluir únicamente documentos provenientes de estos dos países,

dado que su alto nivel de contribución a la problemática está estrechamente vinculado con un mayor desarrollo en la investigación sobre este asunto. Los documentos fueron importados a la herramienta gratuita Mendeley, que ayuda a la identificación de archivos duplicados, en donde se descartaron 13 publicaciones, obteniendo 342 documentos finales que se organizaron en Excel.

El análisis bibliométrico se realizó con los documentos tabulados en Excel, considerando información esencial como palabras clave, título, resumen, año, país, autores, número de citas y de referencias, logrando la identificación y el descarte de aquellos en los que las palabras clave no coincidieran con los términos establecidos en la ecuación de búsqueda y cuyo resumen no evidenciara un reporte de datos de interés, como capacidad, rendimiento y condiciones de operación, entre otros aspectos básicos. Asimismo, se excluyeron los estudios en los que la separación no incluyera el uso de membranas o cuyo objetivo de interés en la separación no fuera el CO_2 .

Luego de clasificar la información, se realizó un análisis de los tipos de membranas utilizadas para la captura de CO_2 , teniendo en cuenta características como tipo de membrana, el material, las técnicas de separación, condiciones de operación, capacidades, rendimientos, costos, entre otros. Se consideraron únicamente los artículos cuyo enfoque estaba contemplado dentro de los criterios de inclusión y en el campo de la ingeniería química, pues esta problemática es de carácter interdisciplinario. Finalmente, se seleccionaron 138 documentos para un análisis completo.

2.3 Identificación de avances y desafíos.

Una vez tabulada y clasificada la información, se identificaron diversos tipos de membranas para la captura de CO_2 junto con sus respectivas técnicas de separación, evidenciándose avances en cuanto a la eficiencia y el rendimiento. Para esta clasificación se

consideraron múltiples factores, los cuales han permitido identificar que, gracias al uso de mecanismos como el transporte facilitado y la adsorción selectiva, se reduce el consumo energético, optimiza la estabilidad operativa y mejora la eficiencia en la separación de CO₂, favoreciendo su aplicación a escala industrial.

Adicional a esto y como complemento de la información, se evaluó el nivel de madurez de estas tecnologías mediante la metodología TRL (*Technology Readiness Levels*), la cual clasifica el desarrollo tecnológico basado en 9 niveles, desde el nivel 1, que representa los principios teóricos o fase conceptual, hasta el nivel 9, indicando su implementación en el mercado (*Ministerio de Ciencia, Tecnología e innovación, 2021*).

3. Resultados y discusión

3.1 Ecuaciones de búsqueda: resultados protocolo PRISMA

Los resultados obtenidos en las bases de datos se presentan en la Tabla 3, los cuales fueron depurados de acuerdo con los criterios descritos en la metodología.

Tabla 3

Ecuación y resultados obtenidos por cada plataforma de búsqueda.

BASE DE DATOS	ECUACIÓN DE BÚSQUEDA	RESULTADOS
SCOPUS	TITLE ABS KEY ((separation OR filtration OR filtering) AND (“carbon dioxide” OR “CO ₂ ” OR “carbon anhydride” OR “carbon dioxide anhydride”)) AND (membranes) AND (capture OR catch OR captured OR extract))	4661
WOS	(separation OR filtration OR filtering) AND (“carbon dioxide” OR “CO ₂ ” OR “carbon	2809

anhydride” OR “carbon dioxide anhydride” AND (membranes) AND (capture OR catch OR captures OR extract)	
TOTAL	7470

Se realizó un filtrado inicial de documentos a partir de títulos y palabras claves, obteniéndose un total de 354 registros, estos fueron exportados a Mendeley, donde se identificaron y eliminaron 13 documentos duplicados

Posteriormente, los 341 documentos restantes fueron evaluados a partir de sus resúmenes y resultados, lo que permitió descartar 203 publicaciones que no guardaban relación con el objetivo central de la investigación.

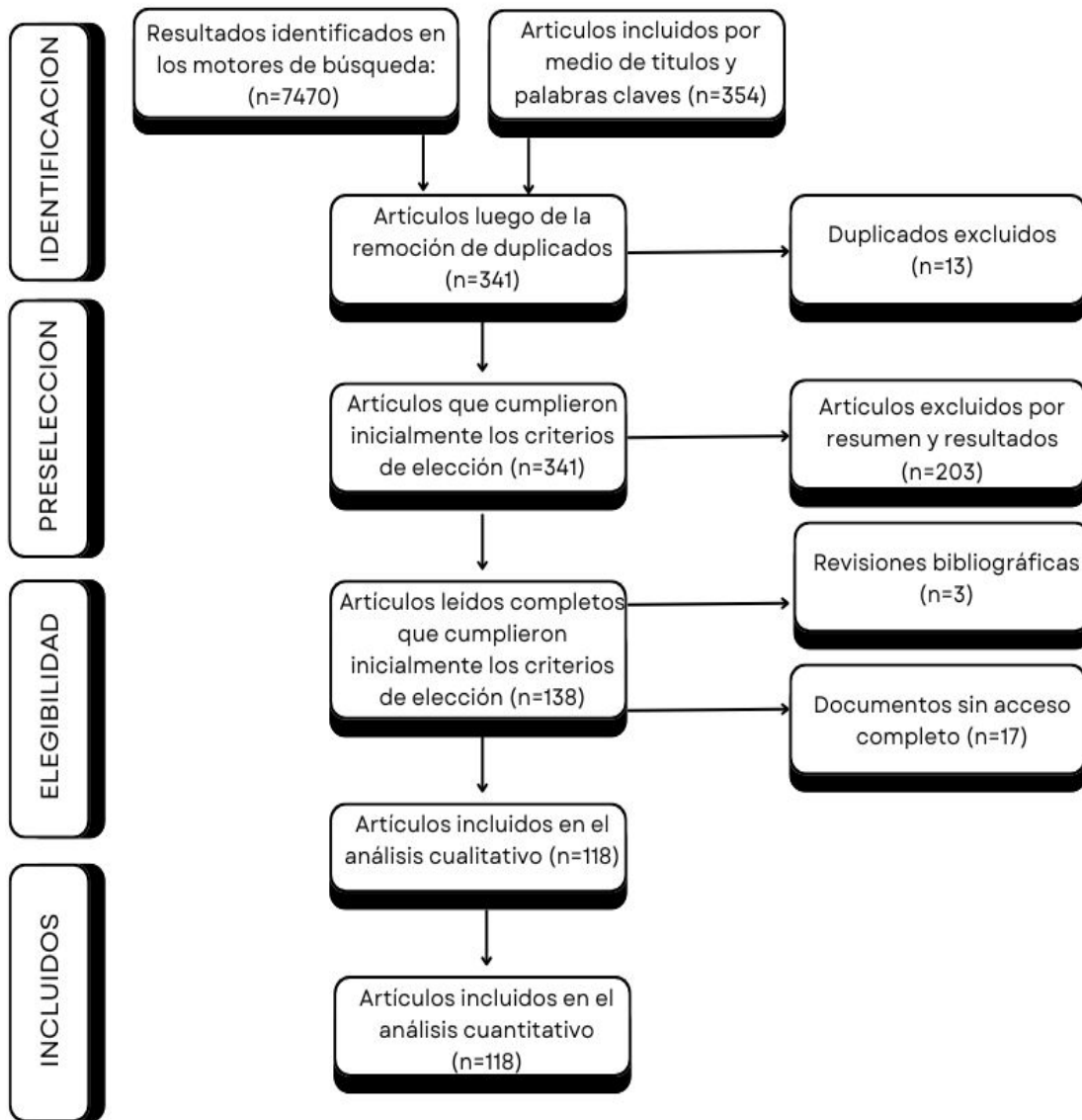
Luego de realizar la lectura de los documentos seleccionados, se hallaron 3 revisiones sistemáticas y 17 documentos sin licencia para la lectura completa; por lo tanto, no se tuvieron en cuenta. Finalmente, se eligieron 118 artículos para realizar el análisis bibliométrico. Los resultados al aplicar el protocolo PRISMA se presentan en la Figura 2.

3.2 Análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico de la literatura revisada fue organizado en Excel de acuerdo con los autores, año de publicación, idioma, revista de origen y número de citas. Adicional a esto, se buscó información importante como el tipo de membrana, materiales, costos, técnicas de separación, condiciones de operación, ventajas y desventajas.

Figura 2

Diagrama de flujo del método PRISMA.



En el transcurso de la investigación se reveló un creciente interés en esta tecnología, debido a que en los últimos años ha venido aumentando significativamente el número de publicaciones; en la Tabla 4 se pueden observar el número de publicaciones/año en las diferentes bases de datos. En la Tabla 5 se observan las revistas con más publicaciones, con un mayor porcentaje de publicaciones en China (89 %) y EEUU (10,95 %).

Tabla 4

Número de publicaciones por año en cada base de datos.

AÑO	SCOPUS	WOS
2021	65	56
2022	27	71
2023	112	65
2024	130	89
2025	52	10

Tabla 5

Principales sitios de publicación sobre membranas para la captura de CO₂.

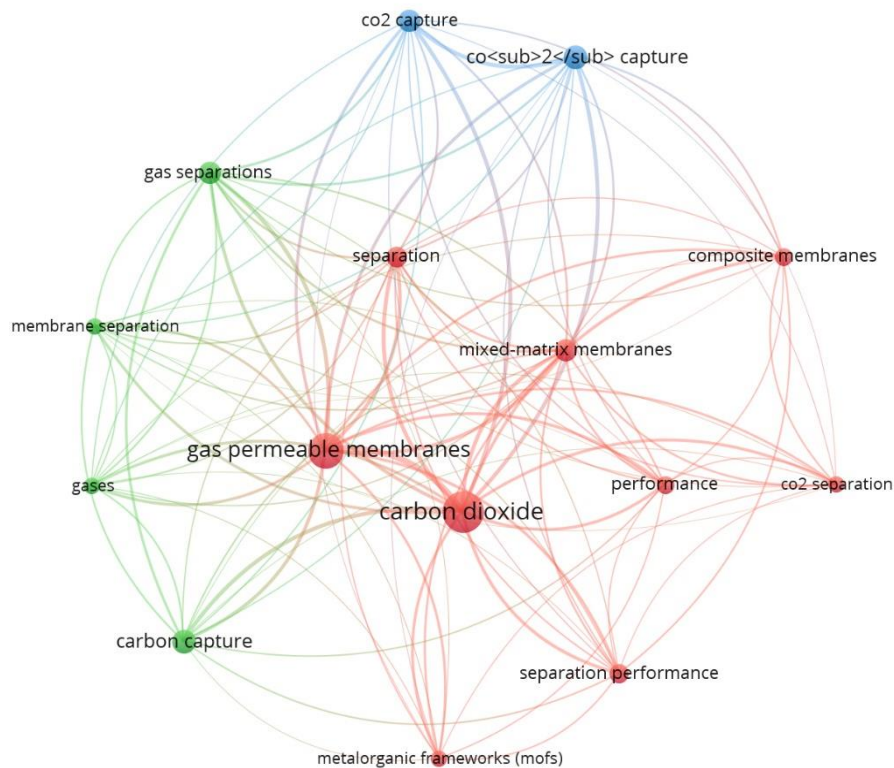
SITIO DE PUBLICACIÓN	# DE PUBLICACIONES
Ministry of Education of the People's Republic of China	23
Tianjin University	30
Chinese Academy of Sciences	33
Dalian University of Technology	18
National University of Technology	29
University Technology Petronas	16
Tiangong University	14
Nanjing Tech University	12
The University of Edinburgh	12
State Key Laboratory of Chemical Engineering	12
Guangdong Technion-Israel Institute of Technology	11
CNRS Centre National of the Recherche Scientifique	9
Sichuan University	9
Technion Israel Institute of Technology	9
University of Chinese Academy of Sciences	9

En la Figura 3 se puede observar que los términos más recurrentes en los estudios analizados son *carbon dioxide*, *gas permeable membranes*, *separation* y *CO₂ capture*, destacando su relación con la captura de CO₂ con membranas. Dentro de los nodos rojos aparecen términos menos frecuentes como *separation performance* y *composite membranes*, lo que sugiere que muchas de las investigaciones se centran en optimizar la eficiencia del proceso de separación.

Además, la conexión con *Metal Organic frameworks (MOFs)* y *Mixed-matrix membranes* indica un interés en materiales emergentes e innovadores, buscando mejorar la estabilidad y el desempeño de las membranas.

Figura 3

Mapa sobre la relación entre palabras clave de los artículos seleccionados realizado en Vosviewer.



Por último, se realizó un análisis a las revistas con mayor impacto en esta área de investigación, analizando variables como el número de citas y frecuencia de aparición. En los resultados mostrados en la Tabla 6 se puede observar que *Climate Action* lidera con 1020 citaciones y 59 artículos, siendo esta la fuente más influyente en este ámbito, seguida de *Separation and Purification Technology* con 237 citaciones y 27 artículos, y *Affordable and Clean Energy*,

Climate Action con 182 citaciones y 8 artículos. Estas revistas se enfocan en áreas especializadas de Ingeniería Química, tecnologías de separación, control de emisiones y cambios climáticos, siendo fuentes confiables para futuras investigaciones.

Tabla 6

Revistas más citadas sobre el uso de membranas para la captura del CO₂.

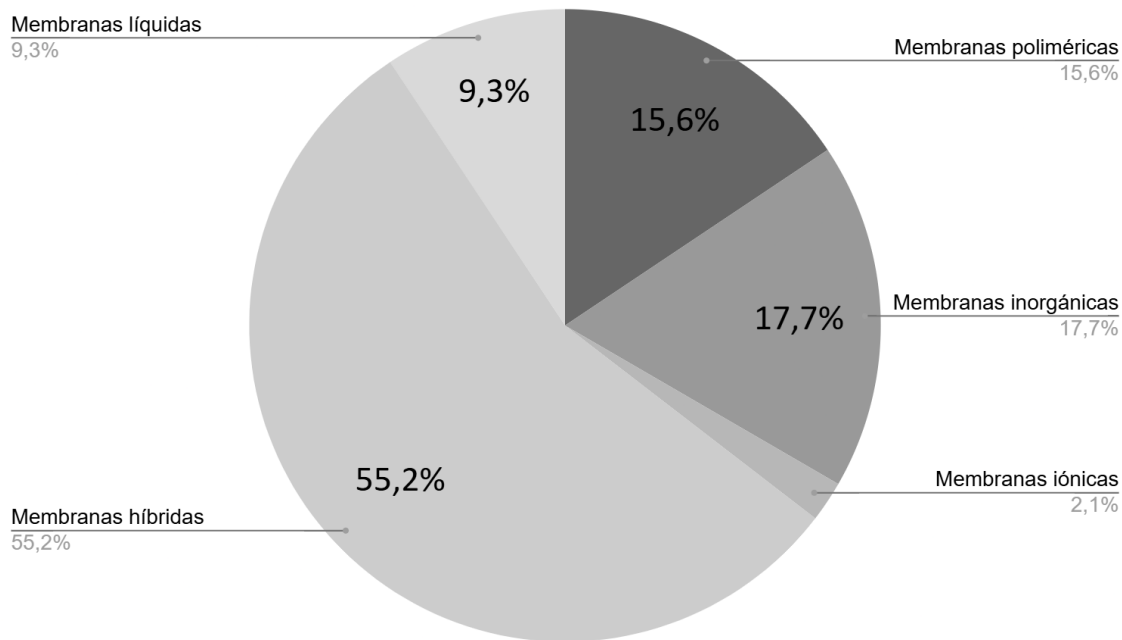
REVISTA	CITACIONES	ARTÍCULOS PUBLICADOS
Climate action	1020	59
Separation and purification Technology	237	27
Affordable and clean energy, climate action	182	8
Industry, innovation and infrastructure; climate action	179	12
Applied catalysis environment and energy	120	1
Green chemical engineering	66	2
ACS sustainable chemistry and engineering	48	2
Industrial and engineering chemistry research	40	5
Carbon Capture Science and Technology	9	2

3.3 Tipos de membranas

Las membranas utilizadas para la captura de CO₂ han evolucionado con el desarrollo de diferentes características como el rendimiento, la selectividad y la eficiencia. Estas pueden clasificarse en: poliméricas, inorgánicas, electroquímicas, híbridas y líquidas, con características específicas según los requerimientos de las industrias. En la Figura 4, se puede observar la distribución del tipo de membranas utilizadas en los estudios realizados en China y Estados Unidos, publicados en los últimos 5 años.

Figura 4

Distribución según el tipo de membrana



Los resultados representados en la Figura 4 indican una preferencia por el uso de membranas híbridas en comparación con las demás, reflejando la utilización de materiales compuestos debido a su rendimiento, con ventajas como: alta selectividad y permeabilidad, pues la incorporación de MOFs (*Metal-Organic Frameworks*) y COFs (*Covalent Organic Frameworks*) en matrices ha permitido aumentar la eficiencia de separación de CO₂, con valores de selectividad superiores a 50 en algunos estudios (*Liang et al., 2025*), y mayor estabilidad térmica y química, mostrando resistencia a temperaturas superiores a los 200 °C, adecuadas para aplicaciones industriales de gran exigencia (*Zhang et., 2025*). Asimismo, la implementación de materiales inorgánicos como zeolitas, ha mejorado la resistencia química y evitado el deterioro de la membrana (*Peng et al., 2024*). También presentan menor consumo energético en comparación con

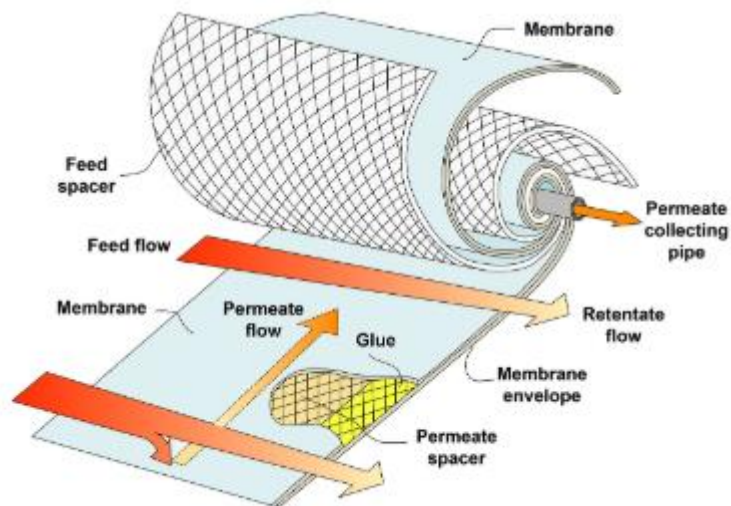
tecnologías tradicionales, pues pueden operar a bajas presiones sin requerir regeneración térmica extensa (Dong *et.*, 2025).

3.3.1 Membranas poliméricas

La difusión selectiva de los gases a través de una membrana polimérica, representada en la Figura 5, depende de las propiedades del material y de las moléculas de gas; este proceso ocurre debido a la diferencia de potencial químico, gradiente de presión y concentración, así como a la interacción entre el gas y la membrana. En el lado de alta presión, el gas se absorbe en la interfase, se disuelve y difunde a través de la membrana, para luego desorberse en el lado de baja presión (López Diego, 2021).

Figura 5

Membrana polimérica semipermeable en espiral



Nota. Tomado de (fujifilm, 2025)

Las membranas utilizadas en el proceso de captura del CO₂ se diseñan para optimizar su permeabilidad y selectividad frente a otros gases, permitiendo una separación más eficaz. Dentro de esta tecnología, diversos materiales han demostrado ventajas y desafíos en términos de

rendimiento y estabilidad. En la Tabla 7 se evidencia una recopilación de diferentes membranas poliméricas enfocadas a dicho proceso. Otros casos de estudio se resumen en el Apéndice A.

Tabla 7

Características y Desempeño de Membranas poliméricas en la Captura de CO₂.

MATERIALES	TÉCNICA UTILIZADA	CONDICIONES DE OPERACIÓN	RENDIMIENTO Y SELECTIVIDAD	PERMEABILIDAD	FUENTE
Matrimid optimizado con LiCl	Separación de gases con transporte facilitado	57°C, presión diferencial de 115.1 kPa	Permeabilidad de CO ₂ de 932 GPU. Selectividad 158 CO ₂ /N ₂	2.60 × 10 ⁵ GPU para el sustrato de Matrimid	(Pang et al. 2023)
DIL: [C4mim][Tf2N] (1:2)	Separación de CO ₂ /N ₂ y CO ₂ /CH ₄	3 bar, 20°C	Supera la barrera de Robeson. Selectividad de CO ₂ /N ₂ : 68.1, CO ₂ /CH ₄ : 85.1	40.3 barrer	(Zhang et al. 2022)
Poliimida carbonizada resistente a contaminantes.	Difusión facilitada en membrana de fibra hueca.	50 °C	Membrana robusta ante contaminantes industriales. CO ₂ /N ₂ = 20, con buena resistencia a impurezas.	660 GPU de CO ₂ a 50 °C, (permeabilidad evaluada bajo SO ₂ y Nox)	(Liu et al. 2021)
Polivinilamina (PVAm), sales de aminoácidos, celulosa NC	Transporte facilitado con aminas	35°C, 2 bar	Alta capacidad de separación. Selectividad de 48 CO ₂ /N ₂	160	(Li Y et al. 2023)
Polímero vítreo modificado con MOFs (UiO, MIL, ZIF)	Interfaz de polimerización y dip-coating	Presión 2-10 bar, temp. 30-70 °C	Supera la barrera de Robeson en algunos casos. CO ₂ /CH ₄ : 29, H ₂ /CH ₄ : 34.4, H ₂ /N ₂ : 23.8	CO ₂ : 2494 Barrer, H ₂ : 2932 Barrer	(Yi et al. 2024)

Las membranas poliméricas modificadas, como las basadas en *Polymers of Intrinsic Microporosity* (PIM-1), proporcionan alta permeabilidad al CO₂ debido a su estructura porosa y

baja densidad de empaquetamiento molecular. Sin embargo, su estabilidad química y térmica puede verse comprometida con el tiempo, lo que afecta su desempeño a largo plazo (*Li et al., 2023*). Una estrategia para mejorar su selectividad ha sido la funcionalización con aminas, que permite una interacción más fuerte con el CO_2 , facilitando su captura a bajas presiones. Otra alternativa relevante son las membranas de Matrimid, que son modificadas con sales como el LiCl, aumentando la solubilidad del CO_2 en la matriz polimérica. Estas membranas combinan una buena relación entre permeabilidad y selectividad, aunque pueden ser susceptibles a fenómenos de plastificación, lo que reduce su rendimiento en presencia de altas concentraciones de CO_2 (*Pang et al., 2023*).

Por otra parte, las membranas de bisfenol A etoxilato diacrilato (BPA) y polietilenglicol dimetacrilato (PEGDMA) han sido desarrolladas utilizando técnicas de fotopolimerización UV, lo que les otorga una estructura altamente selectiva para el CO_2 . Su principal ventaja radica en la rápida fabricación y bajo consumo energético durante su síntesis. Sin embargo, su estabilidad mecánica puede ser limitada, lo que restringe su vida útil en aplicaciones prolongadas (*Zhang et al., 2022*). Así mismo, las membranas de poliamida carbonizada han demostrado ser altamente resistentes a impurezas, lo que las hace menos propensas a la degradación química; su eficiencia en la captura de CO_2 se debe a la formación de una estructura microporosa estable a altas temperaturas, aunque su producción es costosa y requiere procesos de carbonización controlados para mantener su rendimiento óptimo (*Liu et al., 2021*).

Finalmente, las membranas compuestas de PTMSP en combinación con polietileno óxido (PEO) han destacado por su elevada permeabilidad, permitiendo una rápida separación del CO_2 en comparación con otras membranas poliméricas. No obstante, su desempeño a largo plazo puede

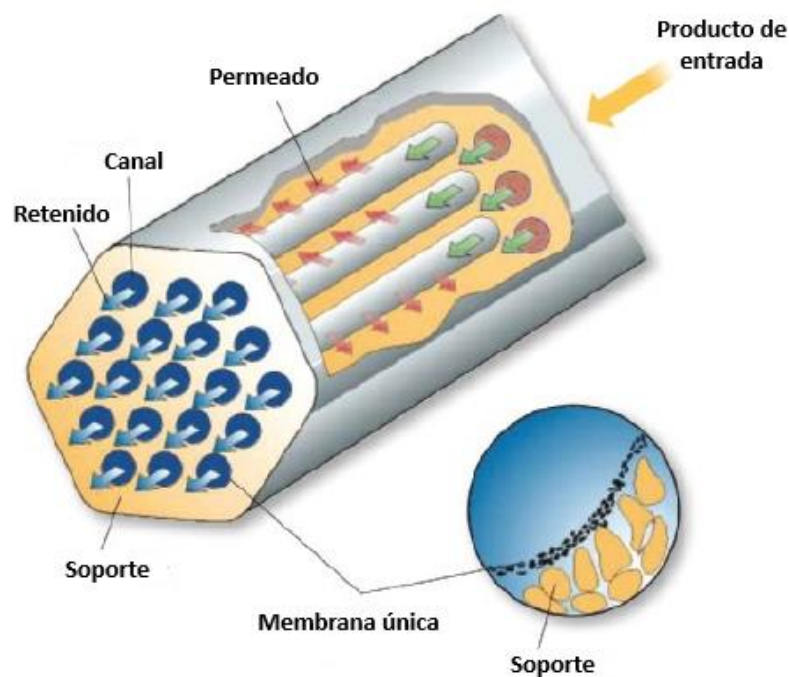
disminuir debido a la relajación estructural del polímero, lo que reduce progresivamente su eficiencia de separación (Yi *et al.*, 2024).

3.3.2 Membranas inorgánicas

Las membranas inorgánicas, ilustrado en la Figura 6, son una tecnología prometedora para la captura de CO₂ debido a su alta estabilidad térmica y química.

Figura 6

Estructura de un elemento tubular cerámico



Nota. Tomado de (Tuset, 2019)

En el Apéndice B se resumen características importantes de los estudios analizados y los más prometedores se describen en la Tabla 8, donde destacan las cerámicas modificadas, los materiales metal-orgánicos (MOF), las membranas de carbón activado y las de zeolita. Las

membranas cerámicas, optimizadas con compuestos como ZIF-8 y líquidos iónicos, alcanzan altas capacidades de adsorción de CO₂ (1.82 mol/mol de absorbente), aunque su rendimiento depende de la presión y el flujo del gas (Li et al., 2025). Por su parte, las membranas de carbón activado, económicas y resistentes, capturan CO₂ por adsorción física, aunque su selectividad puede verse afectada por la composición del gas (Shi et al., 2023).

Tabla 8

Características y Desempeño de Membranas inorgánicas en la Captura de CO₂.

MATERIALES	TÉCNICA UTILIZADA	CONDICIONES DE OPERACIÓN	RENDIMIENTO Y SELECTIVIDAD	PERMEABILIDAD	FUENTES
Cerámica modificada con silanos (n-dodecyltrimetoxisilano o hexadeciltrimetoxisilano)	Absorción química con [TEPA][MIm] y adsorción física con ZIF-8	Presión: 0.1-1.0 L/min de flujo de gas, Temperatura: 25 °C, CO ₂ /N ₂ C: 15-16 % CO ₂	Captura de CO ₂ de 1.82 mol CO ₂ /mol absorbente. Captura de CO ₂ del 90.4 %	No reportada directamente, pero con alta eficiencia de captura	(Li et al. 2025)
Carbón activado derivado de biomasa o coque	Adsorción física basada en interacciones de Van der Waals	Amplio rango de presión y temperatura	Alta reciclabilidad, pero la eficiencia depende del tamaño del poro. Selectividad variable, mejora con funcionalización	Variable, optimizable con modificación superficial	(Shi et al. 2023)
Cerámica (Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , ZrO ₂) y PTFE	Contactores de membrana gas-líquido con absorción química	Poros de 10 nm y 100 nm, absorbente MEA, flujo de gas 2.5-18.1 L/min	Mayor eficiencia en PTFE, pero menor tasa de transferencia. Selectividad PTFE: 99.3 %, Cerámica: 94.7 %	Mayor tasa de transferencia en cerámica	(Fu et al. 2023)

Grafeno oxidado, líquidos iónicos (C4mimBF ₄ , NTf ₂ , PF ₆)	Membranas con canales nanoestructurados para separación CO ₂ /H ₂	Pruebas a 0.5 bar de presión diferencial	Mejor desempeño con líquidos iónicos de cadenas más cortas. CO ₂ /H ₂ : 13.58 (supera la barrera de Robeson)	13.85 GPU para CO ₂ en membranas con C1mimBF ₄	(Dong et al. 2025)
membrana compuesta de carbonato fundido y conductor iónico-electronico de oxígeno mixto	Transporte iónico con carbonato	T=750 °C, t=50 h, P=1 atm, corriente 50 CO ₂ y 50 N ₂ alimentación. He puro para barrido	Alta movilidad de iones. Optimización en separación	83.1 kJ/mol	(Zeng et al. 2021)
Matriz cerámica porosa	Adsorción con cerámicas	60 C y 10 bar	Optimización en adsorción de CO ₂ . CO ₂ /N ₂ : 62.3	600 GPU	(Nilkar et al. 2023)
MOF basado en Ni con ligandos tetrazolato y 4,4'-bipiridina.	Adsorción selectiva de CO ₂ en sitios activos N-Ni-F ⁻ junto con tamizado molecular.	Pruebas a 298 K y 1 bar, con estudios de adsorción hasta 110 kPa.	Alta adsorción de CO ₂ gracias a interacciones con sitios tetrazolato-Ni-F ⁻ . H ₂ /CO ₂ : 14.43	Con permeabilidad de H ₂ de 1,59 × 10 ⁵ Barrer.	(Hou et al. 2023)

Por otra parte, las membranas con contactores gas-líquido (Al₂O₃, TiO₂, PTFE) logran eficiencias superiores al 94 %, pero su rendimiento depende de la humedad y las impurezas en la corriente de gas (Fu et al., 2023). En el caso de las membranas con líquidos iónicos y óxidos de grafeno, su alta permeabilidad (13.85 GPU) y selectividad las hacen una opción viable, aunque su estabilidad a largo plazo requiere mejoras (Dong et al. 2025). Las membranas de transporte iónico con carbonatos fundidos operan a 750 °C, ofreciendo alta eficiencia, aunque requieren materiales resistentes al calor (Zeng et al., 2021). Los MOF con sitios activos de níquel destacan por su elevada absorción y selectividad, pero su síntesis es compleja (Hou et al., 2023). Finalmente, las

zeolitas SSZ-13 y CHA, con poros de 3.8 Å, alcanzan selectividades CO_2/N_2 de hasta 62.3 %, aunque su permeabilidad puede ser limitada (Nilkar *et al.*, 2023).

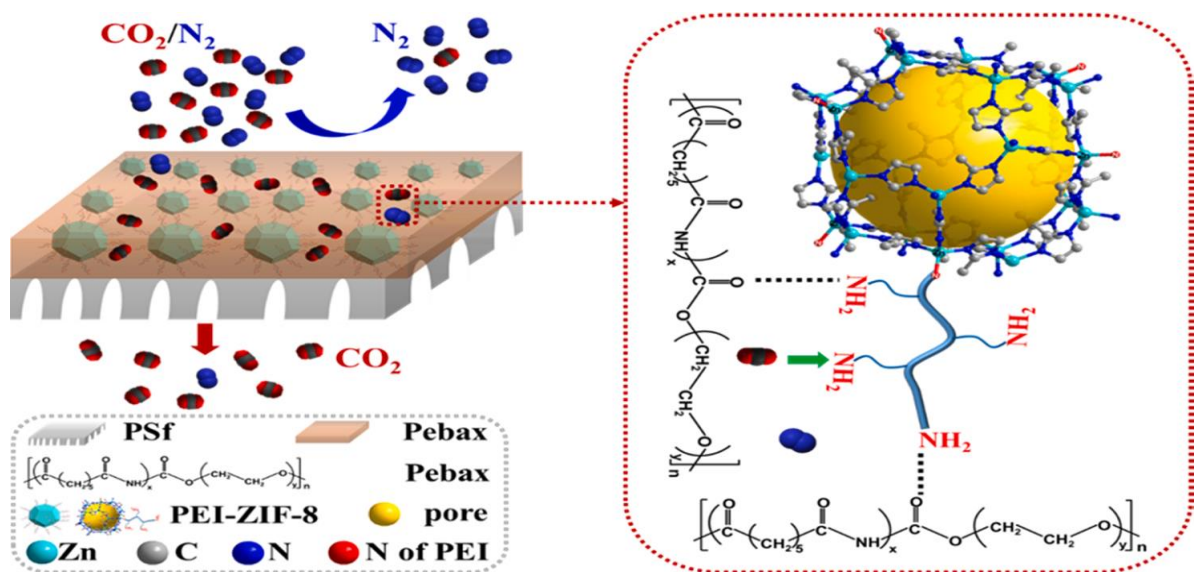
En general, las membranas inorgánicas ofrecen una solución efectiva para la captura de CO_2 , combinando alta estabilidad y selectividad. Sin embargo, su optimización sigue siendo clave para mejorar su rendimiento y viabilidad a gran escala, lo que implica aumentar su selectividad y permeabilidad, mejorar su estabilidad térmica y química, reducir costos de fabricación y explorar estructuras híbridas que potencien su eficiencia en aplicaciones industriales.

3.3.3 Membranas compuestas o híbridas

Las membranas compuestas (Figura 7) se destacan como una de las tecnologías más prometedoras gracias a su capacidad de combinar características de diferentes materiales.

Figura 7

Ilustración de membranas compuestas Pebax/PEI-ZIF-8



Nota. Tomado de (Jiao *et al.*, 2021)

Según la Tabla 9, las membranas están compuestas por polímeros, materiales orgánicos y líquidos iónicos, confiriendo mayor selectividad, permeabilidad y estabilidad térmica. El uso de MOFs en la estructura de las membranas ha permitido el aumento en la eficiencia; por ejemplo, las membranas de Pebax con MOFs mejoran la selectividad CO_2/N_2 hasta en un 80 %, en comparación con membranas poliméricas convencionales (*Xu et al., 2025*). De igual forma, el uso de líquidos iónicos ha demostrado ser efectivo para optimizar el transporte facilitado de CO_2 , reduciendo consumo energético y aumentando la estabilidad operativa (*Dong et al., 2025*), y las membranas de matriz mixta con polímeros funcionalizados son estudiadas por su equilibrio entre la selectividad y la permeabilidad.

Tabla 9

Características y Desempeño de Membranas compuestas en la Captura de CO₂.

MATERIALES	TÉCNICA UTILIZADA	CONDICIONES DE OPERACIÓN	RENDIMIENTO Y SELECTIVIDAD	PERMEABILIDAD	FUENTE
Pebax con Ni	Transporte facilitado	25 °C a 80 °C y presión atmosférica	Rendimiento 80 % y selectividad de 54,2 %	286 - 313 Barrer	Xu et al. (2025)
Polímeros (PVDF y etilcelulosa)	Separación por membrana mixta	27 °C - 80 °C y presión ambiente	Rendimiento de 90 % y selectividad de 21.85 %	891.23 Barrer	Dong et al. (2025)
Pebax con COF	Difusión a través de la membrana	27 °C y 2 bar	Rendimiento de 73.40 % y selectividad de 28.31 %	813.5 Barrer	Liang et al. (2025)
ZIF - 8	Adsorción física	25 a 50 °C y 2 bar	Rendimiento estable y selectividad de 97.5 %	403 Barrer	Zhang et al. (2025)
Pebax con Ni	Separación por adsorción	25 a 50 °C y 1 bar	Rendimiento alto y selectividad de 76.96 %	Variable	Tu et al. (2021)

Por otra parte, el uso de MOFs y COFs en la estructura de las membranas permite una mejora en la eficiencia de captura entre un 30 y 50 %, en comparación con materiales tradicionales (Liang *et al.*, 2025). Es de aclarar que estos materiales son estructuras porosas y cristalinas diseñadas para mejorar la absorción y transporte de CO₂, mientras que los polímeros funcionalizados han sido químicamente modificados para optimizar el desempeño en la separación de gases.

Cabe resaltar que la combinación de múltiples materiales trae ciertas dificultades, ya que se pueden generar problemas de compatibilidad y degradación con el tiempo, disminuyendo la estabilidad. Por ejemplo, en membranas que combinan zeolitas y polímeros se ha observado una pérdida del 20 % de su eficiencia tras largos periodos de operación continua (Zhang *et al.*, 2025). Otra complicación son los elevados costos de producción; aunque en laboratorios resultan eficientes, el escalado a nivel industrial es costoso debido a la complejidad en la síntesis de materiales como MOFs funcionalizados o los líquidos iónicos. A pesar de estas dificultades, los estudios en membranas híbridas avanzan rápidamente, enfocados en la optimización de materiales, reducción de costos y mejora en la durabilidad; la combinación de MOFs con líquidos iónicos soportados en matrices poliméricas representa una solución viable para superar estas limitaciones (Tu *et al.*, 2021). En el Apéndice C se muestran otros estudios analizados durante la revisión.

3.3.4 Membranas líquidas

En comparación con los otros tipos de membranas, de estas se encuentran menos investigaciones; sin embargo, han surgido como una solución prometedora para la captura de CO₂ debido a la alta selectividad y permeabilidad. Con base en la información recopilada en la Tabla 10 (en el Apéndice D se muestran estudios complementarios), se pudo observar que estos materiales se han desarrollado con diversos enfoques, como el uso de líquidos iónicos, polímeros

funcionalizados y estructuras metal-orgánicas (MOFs). Los avances que presentan este tipo de membranas permiten la mejora de la adsorción y el transporte de CO₂, optimizando también el rendimiento, permeabilidad y diferentes condiciones operativas. Uno de los desarrollos más notables es la funcionalización de MOFs con oligómero y PEAs, lo que ha demostrado una alta capacidad de adsorción de CO₂. Se reportan mejoras de hasta un 117 % en comparación con materiales no modificados (Cheng *et al.*, 2024). Así mismo, el uso de PTFE con MOFs de Cu/Mg y líquidos iónicos ha permitido alcanzar permeabilidades de hasta 4628 Barrer con humedad del 50 %, aunque con una selectividad moderada de 33.26 CO₂/N₂ (Ali *et al.*, 2023).

Tabla 10

Características y Desempeño de Membranas líquidas en la Captura de CO₂.

MATERIALES	TÉCNICA UTILIZADA	CONDICIONES DE OPERACIÓN	RENDIMIENTO Y SELECTIVIDAD	PERMEABILIDAD	FUENTE
MOF <i>UIO</i> – 66 – (OH) ₂ funcionalizado con oligomero SIT y PEAs	Adsorción selectiva	Temperatura y presión ambiente	Rendimiento estable durante meses. Selectividad alta para CO ₂ /N ₂	Alta capacidad de adsorción de CO ₂ , mejorando hasta un 117 %	Cheng <i>et al.</i> (2024)
PTFE con MOFs Cu/Mg y líquidos iónicos	Separación por líquidos iónicos	Presión de 0.5 a 2 bar, humedad de 30 a 50 %	Mayor permeabilidad con humedad alta, pero menos selectividad. Selectividad de 33,26 % Control de difusión de CO ₂ en nanoestructuras. Selectividad depende del solvente	2937 Barrer (Seco) y 4628 Barrer (humedad 50 %)	Ali <i>et al.</i> (2023)
Líquidos porosos basados en jaulas orgánicas	Adsorción selectiva con efecto de nanoconfinamiento	Variable según solventes	Control de difusión de CO ₂ en nanoestructuras. Selectividad depende del solvente	Alta estabilidad mecánica	Li & Yuan. (2024)
Líquido iónico soportada SILM	Separación facilitada	40 °C y 0,1 bar	Rendimiento alto y	2572 Barrer	Tu <i>et al.</i> (2021)

Líquidos iónicos sobre un soporte de PVDF poroso	Adsorción selectividad	Temperatura ambiente y 0.6 MPa	selectividad de 78 % Rendimiento de 35.4 % y selectividad de 56.2 %	Alta absorción	Pan et al. (2021)
Líquidos iónicos con diferentes grupos funcionales	Transporte facilitado	35 °C y 2 bar	Rendimiento alto y selectividad de 53.2 %	2000 Barrer	Li et al. (2023)

Por otra parte, las membranas líquidas soportadas (Figura 8) han mostrado altas tasas de permeabilidad, como en el caso de las estructuras con líquidos iónicos, reportando hasta 2572 Barrer, rendimiento alto y una selectividad de 78 CO_2/N_2 (Tu et al., 2021). Las membranas de líquidos iónicos sobre soportes porosos de PVDF presentan un excelente equilibrio entre absorción de CO_2 y selectividad, ya que su estructura permite una alta captación del gas sin comprometer la capacidad de diferenciar entre el CO_2 y otras moléculas; esto se traduce en una eficiencia de 56.2 % de separación de CO_2 en comparación con otros gases (Pan et al., 2021).

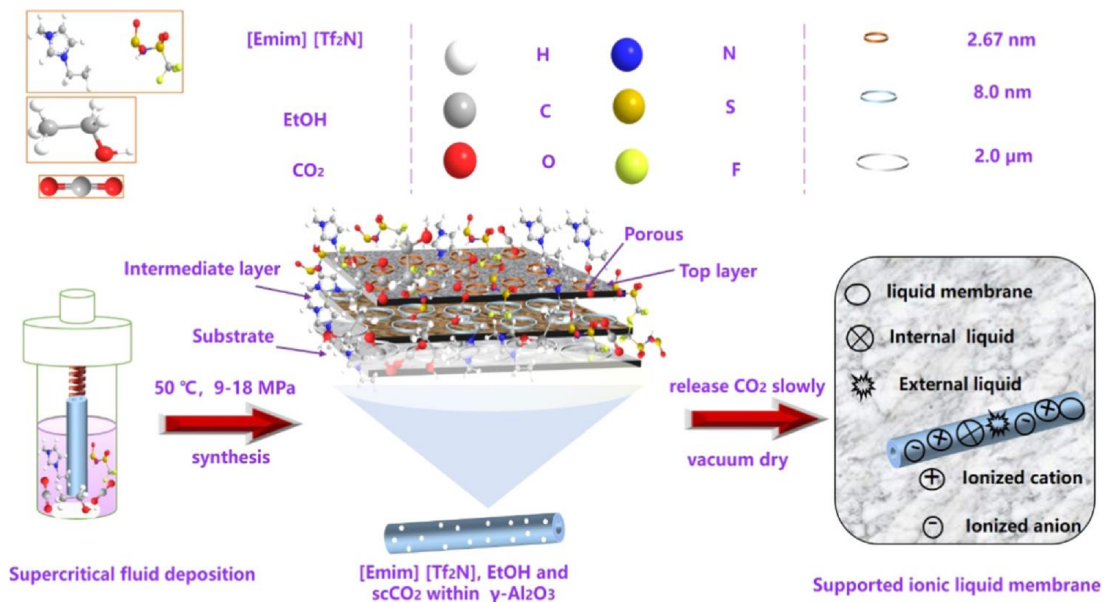
A pesar de los avances, las membranas líquidas enfrentan varios retos tecnológicos. La estabilidad mecánica y química es una de las principales limitaciones. Por ejemplo, en las membranas porosas basadas en jaulas orgánicas, la selectividad depende significativamente del solvente utilizado, lo que limita su aplicación en procesos industriales de gran escala (Li & Yuan, 2024). Otro de los desafíos que combaten estas membranas es su escalabilidad; aunque las membranas con líquidos iónicos han demostrado un rendimiento óptimo en condiciones específicas, como 35 °C y 2 bar con una permeabilidad de 2000 Barrer y selectividad de 53.20 CO_2/N_2 (Li et al., 2023), la fabricación de estos sistemas aún es costosa en comparación con alternativas más convencionales, como las membranas poliméricas y cerámicas. Estas alternativas han sido estudiadas y utilizadas en la industria ya que presentan mejores características como una

mayor estabilidad estructural, menor costo de fabricación y facilidad para implementar en procesos de gran escala.

Figura 8

Procesos de preparación de membrana de líquido iónico soportado por CO supercrítico.

Método de deposición.



Nota. Tomado de (Sun et al, 2021)

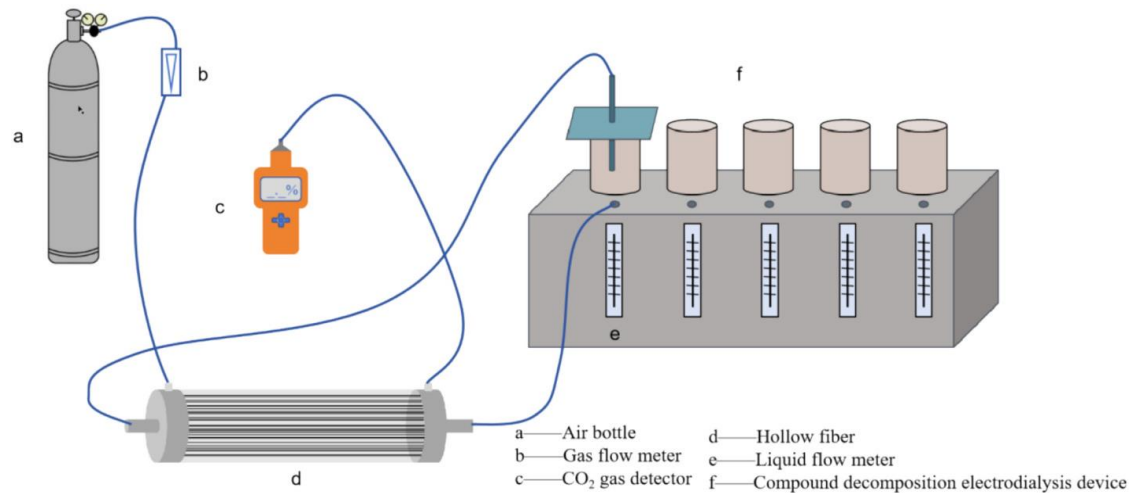
La optimización de la estabilidad a largo plazo, la reducción de costos y la adaptabilidad a diversas condiciones industriales siguen siendo los principales desafíos a superar. La tendencia futura se enfoca en la integración de materiales híbridos y el desarrollo de membranas más resistentes a la degradación química y mecánica, con el objetivo de mejorar la viabilidad comercial de estas tecnologías.

3.3.5 Membranas iónicas o electroquímicas

Según lo mostrado en la Tabla 11, es posible identificar que las membranas iónicas o electroquímicas (Figura 9), fabricadas con materiales como el politetrafluoroetileno (PTFE) y polímeros conductores de iones, permiten procesos avanzados como la captura y conversión de CO₂ en bicarbonato de sodio (NaHCO₃), lo que no solo facilita su almacenamiento, sino que también abre la posibilidad de reutilización en diversas aplicaciones.

Figura 9

Dispositivo de absorción de gas.



Nota. Tomado de (Dong et al, 2024)

Uno de los métodos aplicados en estas membranas es la electrodiálisis de membrana bipolar, la cual opera en condiciones controladas de temperatura ambiente y pH, logrando una pureza del 90.9 % en la producción de NaHCO₃ con un consumo energético de 0.52 kW·h/kg. Este proceso destaca por su elevada eficiencia de captura, alcanzando un 78.94 %, y un mecanismo mejorado de regeneración que permite la recuperación total del CO₂ capturado (Dong et al., 2024).

Tabla 11

Características y Desempeño de Membranas iónicas en la Captura de CO₂.

MATERIALES	TÉCNICA UTILIZADA	CONDICIONES DE OPERACIÓN	RENDIMIENTO Y SELECTIVIDAD	PERMEABILIDAD	FUENTE
PTFE, polímero conductor de iones	Captura y conversión de CO ₂ en NaHCO ₃	Temperatura ambiente, pH controlado T de 80 a 98 °C P= 10 atm . NaOH de 0,3 mol/L a un caudal de 6,4 litros por minuto. t=3 horas y 30 min. relación L/G kg/kg =4.3.	90,9 % de pureza en NaHCO ₃ producido. 78,94 % de eficiencia de captura	0,52 kW·h/kg NaHCO ₃	(Dong et al. 2024)
Membranas bipolar electroquímicas	electrodiálisis de membrana bipolar	gas con composición de 16 % de CO ₂ . Volumen= 0,012 m ³ . voltaje celda= 18 corriente =7,5 A. T= 30 °C P=101,32 KPa. concentración Na=0,2 mol/L	Proceso de regeneración mejorado. 3-4 MJ/Kg de CO ₂ se logró reducir a 1,18 MJ/Kg de CO ₂ capturado	recuperación del 100 % del CO ₂ , eficiencia del 97 %	(Valluri et al. 2021)

Por otro lado, se reporta que los procesos de captura basados en membranas iónicas pueden optimizar significativamente el consumo energético. Por ejemplo, Valluri et al, (2021) demostraron que el requerimiento energético para capturar CO₂ pudo reducirse de 3-4 MJ/kg a 1,18 MJ/kg de CO₂, lo que representa una mejora sustancial en términos de eficiencia energética. Además, bajo condiciones específicas de operación, como temperaturas entre 80 y 98 °C y presiones de 10 atm, estas membranas han mostrado una eficiencia del 97 %.

Las membranas iónicas representan una alternativa sostenible y eficiente para la captura y conversión de CO_2 en productos reutilizables, gracias a su alta selectividad y capacidad de conducción iónica. Sin embargo, su escalabilidad y costos siguen siendo un desafío, ya que su síntesis involucra materiales costosos como líquidos iónicos específicos ([BMIM][BF₄], [EMIM][Tf₂N]), polímeros avanzados (Nafion, SPEEK, PBI), nanomateriales funcionalizados (MOFs, CNTs, óxidos metálicos) y electrodos con metales nobles (Pt, Au, Ag, Cu). Además, la fabricación de estas membranas requiere procesos complejos, y su estabilidad y durabilidad en entornos industriales aún necesitan mejoras para garantizar su viabilidad a gran escala. Para aumentar su viabilidad es fundamental optimizar su diseño, reducir costos de fabricación y explorar combinaciones con otras tecnologías, como reactores electroquímicos o sistemas híbridos, que potencien su eficiencia y amplíen sus aplicaciones en la reducción de emisiones de carbono.

En el apéndice E, se presenta una comparación entre los distintos tipos de membranas evaluadas, considerando características clave analizadas en esta investigación, tales como costos, capacidades de separación, condiciones de operación, entre otros factores relevantes. Considerando estos criterios, las membranas compuestas se posicionan como las más eficientes para la separación y captura de CO_2 . Estas membranas logran combinar la alta permeabilidad de las matrices poliméricas con la elevada selectividad y resistencia de los materiales inorgánicos, ofreciendo así un equilibrio superior en comparación con las membranas puramente poliméricas o completamente inorgánicas.

Además, presentan una notable resistencia a condiciones de operación exigentes, incluyendo presencia de humedad, temperaturas moderadas y contaminantes. Otro aspecto destacable es su versatilidad en el diseño, ya que pueden ser funcionalizadas con nanopartículas,

estructuras metal-orgánicas (MOFs) o zeolitas, lo que permite optimizar su desempeño según las necesidades específicas del proceso.

Finalmente, las membranas compuestas también resultan ser más económicas de fabricar que las membranas 100 % inorgánicas, lo que refuerza su viabilidad para aplicaciones a gran escala.

3.4 Patentes Registradas de Membranas para la Captura de CO₂

La innovación en tecnologías de captura de CO₂ ha generado un número significativo de patentes a nivel mundial, destacando especialmente en China y Europa. De acuerdo con *TT Consultants (2023)*, China lidera el desarrollo con un total de 6339 patentes registradas en este ámbito, mientras que Europa cuenta con 4826 registros, reflejando el fuerte compromiso de ambos mercados con la investigación en separación de gases y mitigación del cambio climático. A continuación, se mencionan algunas innovaciones destacadas.

La patente ES2317211T3, *Membranas compuestas de poliamida de película delgada con permeabilidad y selectividad mejoradas para la separación de gases*, describe el desarrollo de membranas diseñadas para mejorar la eficiencia en la captura de dióxido de carbono (CO₂). Esta invención se basa en la fabricación de membranas compuestas que incorporan una capa activa de poliamida de película delgada, optimizando la permeabilidad y selectividad en procesos de separación de gases (*Oficina Española de Patentes y Marcas [OEPM], 2009*). Este tipo de tecnología es fundamental en aplicaciones industriales, especialmente en la captura y purificación de CO₂ en plantas de generación de energía, industrias químicas y procesos de refinación, como es el caso de New Logic Research, empresa líder en sistemas de filtración por membranas de alto

rendimiento, que utiliza membranas de poliamida y otros polímeros en sus sistemas VSEP (Vibratory Shear Enhanced Processing) *OEPM, 2009*).

La patente ES2770149A1, *Membrana de poliamida para la separación de gases y procedimiento de fabricación de la misma*, describe el desarrollo de una membrana diseñada para optimizar la eficiencia en la separación de gases, incluyendo la captura de dióxido de carbono (CO_2). Se propone un procedimiento de fabricación optimizado para la membrana, basado en la polimerización interfacial, el cual permite mejorar sus propiedades mecánicas y térmicas. Este proceso incluye la modificación de la capa activa de poliamida mediante la incorporación de aditivos y refuerzos estructurales, lo que incrementa la resistencia mecánica y la estabilidad térmica del material. Estas mejoras aseguran un desempeño eficiente y duradero en condiciones industriales exigentes, facilitando su aplicación en la captura y purificación de CO_2 en entornos de alta presión y temperatura. (*Oficina Española de Patentes y Marcas [OEPM], 2019*). La patente representa un avance significativo en la tecnología de membranas para la captura de CO_2 , al integrar mejoras que enfrentan desafíos cruciales como la estabilidad térmica y la resistencia a la plasticización. Para ello, emplea materiales de alta resistencia al calor, como polímeros avanzados tipo polietereetercetona (PEEK), que garantizan la integridad estructural en condiciones extremas. Además, incorpora nanopartículas inorgánicas, como sílice y zeolitas, que reducen la tendencia a la plasticización, mejorando la durabilidad y selectividad de la membrana. Estas innovaciones hacen que la tecnología sea viable para aplicaciones en la industria energética y química (*OEPM, 2019*).

Para consultar una patente en la página de la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM), se debe ingresar a <https://www.oepm.es>, acceder a "Bases de datos" > "Invenciones" > "Localizador de documentos de invención" o directamente a

<https://consultas2.oepm.es/InvenesWeb/>. Allí, se introduce el número de publicación (en este caso, ES2317211T3 o ES2770149A1) y se pulsa "Buscar", lo que permite acceder al expediente completo de la patente, incluyendo resumen, solicitante y documento en PDF.

3.5 Análisis TRL

Los Niveles de Madurez Tecnológica (TRL) representados en la Tabla 12, constituyen un método de medición empleado para determinar el grado de desarrollo de una tecnología en particular. Cada iniciativa tecnológica se analiza en función de los criterios establecidos para cada nivel, asignándole una clasificación TRL acorde a su avance. Esta escala se compone de nueve niveles, donde el TRL 1 representa la etapa inicial y el TRL 9 indica la máxima madurez tecnológica *Manning C. (2023)*. Para este estudio fue necesario el uso de la calculadora TRL de la Agencia Espacial Europea (ESA), una herramienta que permite estimar el nivel de madurez tecnológica respondiendo preguntas en áreas como diseño, calidad, materiales y software. Al completarlas, indica el TRL alcanzado y los aspectos a mejorar para avanzar al siguiente nivel. Es útil para evaluar tecnologías en desarrollo de forma estructurada.

Las membranas poliméricas se encuentran en un nivel TRL 7-9, debido a su gran avance en términos de comercialización y desarrollo, utilizado en plantas industriales y en separación de gases en procesos como la captura postcombustión. En el caso de las membranas inorgánicas, se establecen en un nivel TRL 5-7 en consecuencia de su alta selectividad y resistencia térmica; sin embargo, su alto costo y fragilidad limitan su implementación a gran escala.

Tabla 12*Niveles de madurez de proyectos de investigación.*

NIVEL	DESCRIPCIÓN
9	Sistema aprobado con éxito en entorno real
8	Sistema completo y certificado a través de pruebas y demostraciones
7	Demostración de sistema o prototipo en un entorno real
6	Modelo de sistema o subsistema o demostración de prototipo en un entorno relevante
5	Validación de componente y/o disposición de los mismos en un entorno relevante
4	Validación de componente y/o disposición de los mismos en un entorno de laboratorio
3	Función crítica analítica y experimental y/o prueba de concepto característica
2	Concepto y/o aplicación de tecnología formulada
1	Principios básicos observados y reportados

Nota. Adaptado de (Ayming España, 2021)

Por otra parte, las membranas híbridas o compuestas se posicionan en un nivel TRL 4-6; a pesar de combinar la flexibilidad de los polímeros con la alta selectividad de los materiales inorgánicos, aún están en fase de desarrollo y siendo probadas en entornos controlados. Las membranas líquidas cuentan con un nivel TRL 3-5 al tratarse de una tecnología emergente; aunque con gran potencial para la captura selectiva de CO₂, todavía cuenta con desafíos en estabilidad y pérdidas significativas de fase líquida. Finalmente, las membranas iónicas se consolidan en un

nivel TRL 5-7; estudios recientes han demostrado que pueden facilitar la captura y conversión de CO₂ en productos de valor agregado, pero su escalabilidad sigue siendo un desafío.

En respuesta a la pregunta de investigación “¿*Cuáles son las membranas óptimas para la separación y captura de CO₂?*”, se concluye que no existe una única membrana que pueda considerarse “perfecta” para todos los casos, ya que su eficiencia depende de las condiciones y requerimientos específicos de cada proceso.

No obstante, las membranas compuestas se destacan como las más prometedoras, debido a su capacidad para combinar las propiedades de diferentes materiales, lo que permite alcanzar un equilibrio entre rendimiento, estabilidad y costos razonables.

4. Conclusiones

La aplicación del protocolo PRISMA permitió establecer criterios de inclusión y exclusión claros, facilitando la selección, organización y análisis de la información relevante sobre membranas para la captura de CO₂. Este enfoque metodológico posibilitó la recopilación sistemática de datos relacionados con aspectos fundamentales como la selectividad, permeabilidad, costos, condiciones de operación, materiales emergentes y tecnologías innovadoras. Esto garantiza una revisión sistemática y objetiva de la literatura, asegurando la calidad y confiabilidad de los resultados obtenidos, lo cual es esencial para identificar tendencias y desafíos en la investigación actual.

El análisis bibliométrico evidenció una tendencia creciente de investigaciones en los últimos años. Este incremento es especialmente evidente en países con altos niveles de emisiones de CO₂ como China y Estados Unidos. Además, se identificó un interés significativo en la investigación de nuevos materiales emergentes como MOFs, COFs y líquidos iónicos, que, aunque aún presentan características a mejorar, están revolucionando este campo de aplicación debido a sus propiedades y el potencial para mejorar la eficiencia en la separación de CO₂. También se destaca el desarrollo de las membranas híbridas e inorgánicas, que combinan las ventajas de los polímeros y los materiales inorgánicos avanzados, lo que mejora significativamente su selectividad y permeabilidad.

Por último, aún existen desafíos cruciales que dificultan la adopción de las tecnologías analizadas a gran escala. Si bien estudios recientes evidencian una transición de pruebas experimentales de laboratorio a aplicaciones más avanzadas, hay limitaciones en términos de estabilidad a largo plazo, especialmente en condiciones operativas rigurosas. Factores como la degradación de materiales, compatibilidad con diferentes compuestos y pérdida de rendimiento

tras largos periodos de uso, continúan afectando su eficiencia en diversas condiciones operativas, además del aumento de costos de producción, particularmente aquellas que emplean materiales emergentes o combinaciones híbridas. Por ende, resulta indispensable realizar estudios más detallados sobre la durabilidad y comportamiento de las membranas en condiciones industriales reales, lo que permitirá avanzar hacia la implementación comercial efectiva, contribuyendo significativamente a los esfuerzos globales por mitigar el cambio climático.

Referencias bibliográficas

- Aframehr, W., Molki, B., Bagheri, R., & Sarami, N. (2022). Capturing CO₂ by a fixed-site-carrier polyvinylamine-/matrimid-facilitated transport membrane. *American Chemical Society (ACS)*. doi:10.1021/acsapm.1c01603
- Ali, S. A., Shah, S. N., Shah, M. U. H., & Younas, M. (2023). Synthesis and performance evaluation of copper and magnesium-based metal organic framework supported ionic liquid membrane for CO₂/N₂ separation. *Chemosphere*, 311(Pt 1), 136913. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136913>
- Baker, R. W., & Lokhandwala, K. (2020). *Membrane technology and applications* (3rd ed.). Wiley.
- Bano, S., Tariq, S. R., Anjum, T., Najam, M., Usman, M., Yasin, M., . . . Khan, A. L. (2022). Development of highly permselective mixed matrix membranes comprising of polyimide and In-MOF for CO₂ capture. *Chemosphere*, 307 doi:10.1016/j.chemosphere.2022.136051
- Bao, J., Li, S., Zhang, X., & Zhang, N. (2024). An energy-economic-environment Tri-objective evaluation method for gas membrane separation processes of H₂/CO₂. *Membranes*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/membranes14010003>

Barrera, M. B. (2017) “TECNOLOGÍA DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ PARA SU USO EN LOS PROCESOS DE RECUPERACIÓN MEJORADA DE ACEITE”. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO, FACULTAD DE INGENIERÍA. Hartmann, D. L., et al. (2013). The physical science basis: Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. ISBN: 978-1107058352.

Benavides, B. H. O. y León, A. G. E. (2007) “INFORMACIÓN TÉCNICA SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO”. INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM. o Smith, P., et al. (2015). Biophysical and biogeochemical impacts of land use change on climate and air quality. *Environmental Science & Technology*, 49(12), 7565-7575. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01172>

Campos Rodriguez, M,J. Marchán Vargas, J,F. (2021). Avances, ventajas y desventajas de los nanomateriales en el tratamiento de aguas residuales: Una revisión sistemática. UNIVERSIDAD CESAR VALLEJO.

Cao, Y., Seyed Alizadeh, S. M., Fouladvand, M. T., Khan, A., Taghvaie Nakhjiri, A., Heidari, Z., . . . Albadarin, A. B. (2021). Mathematical modeling and numerical simulation of CO₂ capture using MDEA-based nanofluids in nanostructure

membranes. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, 1377.

doi:10.1016/j.psep.2021.03.007

Castro Hoyos, A. A. (2019). *Teaching Analytics: una revisión sistemática de literatura*. Ingeniería de Sistemas e Informática.

Chen, D., Li, L., Semiat, R., & He, X. (2023). Process parametric investigation of graphene-oxide-embedded composite membranes for boosting CO₂/N₂ separation American Chemical Society (ACS). doi:10.1021/acs.energyfuels.3c01927

Chen, X., Wang, H., Hu, H., Feng, Y., Tian, L., Shi, W., Liang, H., Yang, Y., Sun, Q., & Li, Y. (2024). Enhanced capacity in cellulose aerogel for carbon dioxide capture through modified by metal–organic framework and organic amine. *Separation and Purification Technology*, 337(126399), 126399. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126399>

Cheng, B., Ma, J., Ju, X., Wei, F., Cheng, W., Li, P., & Liu, X. (2024). Metal-organic framework-based porous liquids via surface functionalization engineering for selective gas adsorption. *Separation and Purification Technology*, 350(127994), 127994. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127994>

"CO₂: EMISIONES MUNDIALES 1995-2023". STATISTA. Recuperado de

<https://es.statista.com/estadisticas/635894/emisiones-mundiales-de-dioxido-de-carbono/o>

Le Quéré, C., et al. (2018). Global Carbon Budget 2018. *Earth System Science Data*, 10(4), 2141-2194. <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018>

Cui, Q., Wang, B., Zhao, X., Zhang, G., He, Z., Long, Y., . . . Ku, A. Y. (2024). Post-combustion slipstream CO₂-capture test facility at jiangyou power plant, sichuan, china: Performance of a membrane separation module under dynamic power-plant operations. (No. 5).Oxford University Press (OUP). doi:10.1093/ce/zkab049

Dai, Z., Deng, J., Ma, Y., Guo, H., Wei, J., Wang, B., . . . Deng, L. (2022). Nanocellulose crystal-enhanced hybrid membrane for CO₂ capture American Chemical Society (ACS). doi:10.1021/acs.iecr.2c01402

De Pascale, M., Benedetti, F. M., Lasseguette, E., Ferrari, M., Papchenko, K., Degli Esposti, M., . . . De Angelis, M. G. (2021). Mixed matrix membranes based on torlon® and ZIF-8 for high-temperature, size-selective gas separations MDPI AG. doi:10.3390/membranes11120982

Dong, H., Wang, Y., Ding, W., Qiu, Y., & He, H. (2025). Accelerated CO₂ preferential permeation using graphene oxide confined ionic liquid membranes for CO₂/H₂ separation. *Separation and Purification Technology*, 354(129158), 129158. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129158>

Dong, S., Huang, W., Li, X., Wang, X., Yan, B., Zhang, Z., & Zhong, J. (2022). Synthesis of dual-functionalized APTES-bentonite/PVDF mixed-matrix membranes for the efficient separation of CO_2/CH_4 and CO_2/N_2 . *Materials Today Communications*, 31 doi:10.1016/j.mtcomm.2022.103431

Dong, Y., Qiu, Y., Wei, H., Liu, C., Wu, K., Liao, J., Ang, E. H., & Shen, J. (2024). Advanced membrane contactor coupled with electrodialysis metathesis for efficient carbon dioxide capture and waste salt remediation. *Desalination*, 592(118111), 118111. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118111>

Du, X., Feng, S., Luo, J., Zhuang, Y., Song, W., Li, X., & Wan, Y. (2023). Pebax mixed matrix membrane with bimetallic CeZr-MOFs to enhance CO_2 separation. *Separation and Purification Technology*, 322 doi:10.1016/j.seppur.2023.124251

Expansión - Datosmacro.com. (2024). Ranking de emisiones de CO_2 por países. Expansión Datosmacro. Recuperado el 18 de febrero de 2025, de <https://datosmacro.expansion.com/analisis/actualidad/20161018/contaminacion-co2-1>

Feng, L., Zhang, Q., Su, J., Ma, B., Wan, Y., Zhong, R., & Zou, R. (2024). Graphene-oxide-modified metal-organic frameworks embedded in mixed-matrix membranes for highly efficient CO_2/N_2 separation. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/nano14010024>

- Feng, X., Qin, Z., Lai, Q., Zhang, Z., Shao, Z.-W., Tang, W., Wu, W., Dai, Z., & Liu, C. (2023). Mixed-matrix membranes based on novel hydroxamate metal–organic frameworks with two-dimensional layers for CO_2/N_2 separation. *Separation and Purification Technology*, 305(122476), 122476. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122476>
- Fu, H., Xue, K., Li, Z., Zhang, H., Gao, D., & Chen, H. (2023). Study on the performance of CO_2 capture from flue gas with ceramic and PTFE membrane contactors. *Energy* (Oxford, England), 263(125677), 125677. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125677>
- Fu, W., Zhang, L., Liu, J., Yang, T., Sun, M., Ma, X., Zhao, Y., & Chen, L. (2025). Ceramic-based composite membranes decorated by incorporating ZIF-8 and PDMS for highly efficient CO_2/N_2 separation. *Separation and Purification Technology*, 352(128142), 128142. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128142>
- Gao, D., Cao, Y., Li, Z., Guo, N., & Zhang, H. (2025). Experimental investigation on the desorption of CO_2 enriched liquids based on ceramic membranes. *Separation and Purification Technology*, 359(130592), 130592. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130592>
- Ge, C., Sheng, M., Yuan, Y., Shi, F., Yang, Y., Zhao, S., Wang, J., & Wang, Z. (2024). Pore-optimized MOF-808 made through a facile method using for fabrication of high-performance mixed matrix composite CO_2 capture membranes. *Carbon*

capture Science & Technology, 10(100156), 100156.

<https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100156>

Giro, R., Hsu, H., Kishimoto, A., Hama, T., Neumann, R. F., Luan, B., . . . Steiner, M. B.

(2023). AI powered, automated discovery of polymer membranes for carbon capture. *Npj Computational Materials*, 9(1) doi:10.1038/s41524-023-01088-3

Guan, J., Huang, T., Liu, W., Feng, F., Japip, S., Li, J., . . . Zhang, S. (2022). Design and

prediction of metal organic framework-based mixed matrix membranes for CO₂ capture via machine learning. *Cell Reports Physical Science*, 3(5) doi:10.1016/j.xcrp.2022.100864

Guo, M., Zhang, Y., Xu, R., Ren, X., Huang, W., Zhong, J., . . . Kanezashi, M. (2021).

Ultrahigh permeation of CO₂ capture using composite organosilica membranes. *Separation and Purification Technology*, 282 doi:10.1016/j.seppur.2021.120061

He, T., Si, B., Gundersen, T., Lin, W., Chen, L., & Zhang, K. (2025). High ethane content

enables efficient CO₂ capture from natural gas by cryogenic distillation. *Separation and Purification Technology*, 352(128153), 128153.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128153>

- He, X., Chen, D., Liang, Z., & Yang, F. (2022). Insight and comparison of energy-efficient membrane processes for CO₂ capture from flue gases in power plant and energy-intensive industry. *Carbon Capture Science & Technology*, 2 doi:10.1016/j.ccst.2021.100020
- Hou, W., Cheng, J., Yang, C., Liu, N., & Zhou, J. (2022). In-situ synthesis of [ni(tzba)_{0.5}(F)(bpy)] membrane with high H₂ permeability through ultramicropores and selective CO₂ adsorption with strong affinity of uncoordinated N-ni-F- active sites. *Separation and Purification Technology*, 306 doi:10.1016/j.seppur.2022.122629
- Huang, W., He, Z., Liu, B., Wang, Q., Zhong, S., Zhou, R., & Xing, W. (2023). Large surface-to-volume-ratio and ultrahigh selectivity SSZ-13 membranes on 61-channel monoliths for efficient separation of CO₂/CH₄ mixture. *Separation and Purification Technology*, 311 doi:10.1016/j.seppur.2023.123285
- Islam, S. Z., Arifuzzaman, M., Rother, G., Bocharova, V., Sacci, R. L., Jakowski, J., . . . Sholl, D. S. (2023). A membrane contactor enabling energy-efficient CO₂ capture from point sources with deep eutectic solvents *American Chemical Society (ACS)*. doi:10.1021/acs.iecr.3c00080
- Jiao, C., Li, Z., Li, X., Wu, M., & Jiang, H. (2020). Improved CO₂/N₂ separation performance of Pebax composite membrane containing polyethyleneimine functionalized ZIF-8. *Separation and Purification Technology*, 259 doi:10.1016/j.seppur.2020.118190

Katare, A., Borgohain, R., Prasad, B., & Mandal, B. (2023). A strategical improvement in the performance of CO_2/N_2 gas permeation via conjugation of L-tyrosine onto the chitosan membrane. *Membranes*, 13(5) doi:10.3390/membranes13050487

Koros, W. J., & Zhang, C. (2017). Materials for next-generation molecularly selective synthetic membranes. *Nature Materials*, 16(3), 289–297 <https://doi.org/10.1038/nmat4865>

Li, E., Chen, Z., Duan, C., Yuan, B., Yan, S., Luo, X., . . . Jiang, Z. (2022). Enhanced CO_2 -capture performance of polyimide-based mixed matrix membranes by incorporating ZnO@MOF nanocomposites. *Separation and Purification Technology*, 289 doi:10.1016/j.seppur.2022.120714

Li, Q., Wu, H., Wang, Z., & Wang, J. (2022). Analysis and optimal design of membrane processes for flue gas CO_2 capture. *Separation and Purification Technology*, 298 doi:10.1016/j.seppur.2022.121584

Li, R., Lian, S., Zhang, Z., & Song, C. (2023). Modeling of hollow fiber facilitated transport membrane modules for post combustion carbon capture process: Evaluation of non-ideal effect and module characteristic. *Chemical Engineering Science*, 276(118795), 118795. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118795>

Li, R., Lian, S., Zhang, Z., Deng, S., & Song, C. (2022). Simulation of a novel hybrid membrane-cryogenic process for post-combustion carbon capture. *Carbon Capture Science & Technology*, 5 doi:10.1016/j.ccst.2022.100075

Li, R., Lian, S., Zhang, Z., Song, C., Han, R., & Liu, Q. (2021). Techno-economic evaluation of a novel membrane-cryogenic hybrid process for carbon capture. *Applied Thermal Engineering*, 200 doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.117688

Li, Y., & Yuan, S. (2024). The role of the nanoconfinement effect in the adsorption of carbon dioxide by porous liquids. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12(28), 10455–10465. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c02556>

Li, Y., Chen, D., & He, X. (2023). Preparation and characterization of polyvinylalcohol/polysulfone composite membranes for enhanced CO₂/N₂ separation. *Polymers*, 15(1), 124. <https://doi.org/10.3390/polym15010124>

Li, Y., Li M., Lin, Z., Eisen, M., Dekel, D., & He, X. (2023). Boosting CO₂/N₂ Separation from Cellulose Nanocrystal-Reinforced and Amine-Rich Facilitated Transport Membranes Comprising Deprotonated Amino Acid Salt and Ultrahigh-Molecular-Weight Polyvinylamine. *American Chemical Society (ACS)*. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.3c01566>

- Li, Y., Zhang, Y., & Wei, X. (2018). Membrane materials and processes for CO₂ capture. *Journal of Membrane Science*, 560, 1-17.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.05.003>
- Li, Z., An, T., Yang, J., Gao, D., Zhang, H., & Zhang, H. (2025). CO₂/N₂ separation using a ceramic membrane contactor and ZIF-8 in [TEPA][MIm]. *Separation and Purification Technology*, 359(130525), 130525.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130525>
- Lian, S., Li, R., Zhang, Z., Liu, Q., Song, C., & Lu, S. (2021). Improved CO₂ separation performance and interfacial affinity of composite membranes by incorporating amino acid-based deep eutectic solvents. *Separation and Purification Technology*, 272 doi:10.1016/j.seppur.2021.118953
- Liang, C., Li, K., Chen, T., Zhang, Y., Yu, J., Wang, Z., Li, H., & Li, X. (2025). Constructing CO₂ capture nanotraps via tentacle-like covalent organic frameworks towards efficient CO₂ separation in mixed matrix membrane. *Chemical Engineering Science*, 301(120801), 120801.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120801>
- Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. C., Ioannidis, J. P. A., & Clarke, M. (2009). The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: Explanation and

elaboration. PLOS Med, 6(7), e1000100.

<https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100>

Lin, Q., Liao, Z., Hu, Y., Sun, J., Jiang, B., Wang, J., & Yang, Y. (2021). Optimal design of a subambient membrane separation system with work and heat integration for CO₂ capture American Chemical Society (ACS). doi:10.1021/acs.iecr.1c02303

Lin, Z., Liu, Y., Zhang, Z., & Yao, J. (2022). Preparation and characterization of OH/SiO₂-TiO₂/PES composite hollow fiber membrane using gas-liquid membrane contactor for CO₂/CH₄ separation. Separation and Purification Technology, 288 doi:10.1016/j.seppur.2022.120551

Lin, Z., Liu, Y., Zhang, Z., Wu, R., Fang, R., Zhao, Z., Shao, B., & Yao, J. (2023). Preparation of OH/TiO₂/PES composite membrane by a novel gas-phase hydrolysis method in gas-liquid membrane contactor to improve the separation efficiency of CO₂ and CH₄. Separation and Purification Technology, 312(123352), 123352. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123352>

Liu, L., Lee, J. H., Han, S. H., Ha, S. Y., Chen, G. Q., Kentish, S. E., & Yeo, J. (2021). Assessment of membrane performance for post-combustion CO₂ capture. Industrial & Engineering Chemistry Research, 61(1), 777. doi:10.1021/acs.iecr.1c03987

- Liu, Q., Liu, J., Li, M., Yu, T., Hu, M., Jia, P., . . . Chen, Z. (2022). Plasticization of a novel polysulfone based mixed matrix membrane with high-performance CO₂ separation studied by positron annihilation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 654 doi:10.1016/j.colsurfa.2022.130108
- Liu, Z., Cong, S., Zhang, J., Dong, G., & Zhang, Y. (2024). Mixed matrix membrane with amorphous metal-based complexes displays high CO₂ separation performance. *Separation and Purification Technology*, 330(125349), 125349. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125349>
- Liu, Z., Li, X., He, W., Zhao, G., Yang, Y., Liu, X., . . . Lu, G. (2021). Synergistic effect of charge and strain engineering on porous g-C₉N₇ nanosheets for highly controllable CO₂ capture and separation. *Separation and Purification Technology*, 282 doi:10.1016/j.seppur.2021.120135
- López Diego, D. (2021). Membranas de matriz mixta basadas en Matrimid® 5218 y redes de polímeros porosos para la separación de gases. Universidad de Valladolid. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/49604>
- Lu, Y., Ma, L., Li, Z., & Zhang, H. (2022). Fouling resistance in CO₂ separation membranes: Mechanisms and mitigation strategies. *Journal of Membrane Science*, 625, 118090. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118090>

Luo, W., Niu, Z., Mu, P., & Li, J. (2022). MXene/poly(ethylene glycol) mixed matrix membranes with excellent permeance for highly efficient separation of CO₂/N₂ and CO₂/CH₄. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 640 doi:10.1016/j.colsurfa.2022.128481

Luo, W., Niu, Z., Mu, P., & Li, J. (2022). Pebax and CMC@MXene-based mixed matrix membrane with high mechanical strength for the highly efficient capture of CO₂. *Macromolecules*, 55(21), 9851. doi:10.1021/acs.macromol.2c01532

Manning, C. G. (2023, septiembre 27). Technology Readiness Levels NASA. <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels>

Membranas de separación de gas. (s/f). Fujifilm.com. Recuperado el 31 de marzo de 2025, de <https://www.fujifilm.com/pe/es/business/manufacturing-process/gas-separation-membranes/overview>

Menezes, T. R., Santos, K. M. C., Mao, H., Santos, K., De Conto, J. F., Reimer, J. A., Dariva, S. M. E., & Santana, C. C. (2025). Efficient separation of carbon dioxide and methane in high-pressure and wet gas mixtures using Zr-MOF-808. *Separation and Purification Technology*, 354(129033), 129033. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129033>

Miao, F., & Jiang, H. (2022). A windowed carbon nanotube membrane for CO_2/CH_4 gas mixture penetration separation: Insights from theoretical calculation. *RSC Advances*, 12(26), 16604. doi:10.1039/d2ra02756a

Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. (2021). Niveles de madurez tecnológica y de manufactura: TRL y MRL. Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://minciencias.gov.co>

Ni, Z., Cao, Y., Zhang, X., Zhang, N., Xiao, W., Bao, J., & He, G. (2023). Synchronous design of membrane material and process for pre-combustion CO_2 capture: A superstructure method integrating membrane type selection. *Membranes*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/membranes13030318>

Ni, Z., Li, S., Zhang, X., Bao, J., & Zhang, N. (2025). Analysis and comparison of the membrane-cryogenic hybrid process and multistage membrane process for pre-combustion carbon capture based on the superstructure method. *Separation and Purification Technology*, 353(128636), 128636. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128636>

Nilkar, A. S., Orme, C. J., Klaehn, J. R., Zhao, H., & Adhikari, B. (2023). Life cycle assessment of innovative carbon dioxide selective membranes from low carbon emission sources: A comparative study. *MDPI AG*. doi:10.3390/membranes13040410

Oficina Española de Patentes y Marcas. (2009). Membranas compuestas de poliamida de película delgada con permeabilidad y selectividad mejoradas para la separación de gases (Patente ES2317211T3). Recuperado de <https://www.oepm.es>

Pan, Y., Li, R., Li, P., Wang, Y., Zhu, Y., Xu, Z., . . . Jiang, B. (2021). Facile fabrication of flexible, large-sized organic nanoporous membrane by electrospinning technique based on microporous polymer nanoparticles. *Microporous and Mesoporous Materials*, 317 doi:10.1016/j.micromeso.2021.110955

Pang, R., Han, Y., Chen, K. K., Yang, Y., & Ho, W. S. W. (2022). Matrimid substrates with bicontinuous surface and macrovoids in the bulk: A nearly ideal substrate for composite membranes in CO₂ capture. *Applied Energy*, 311 doi:10.1016/j.apenergy.2022.118624

Peng, L., Duan, Z., Cen, S., & Gu, X. (2024). Tungsten-doped high-silica CHA zeolite membranes with improved hydrophobicity for CO₂ separation. *Separation and Purification Technology*, 342(126922), 126922. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126922>

Peng, L., Duan, Z., Cen, S., & Gu, X. (2024). Tungsten-doped high-silica CHA zeolite membranes with improved hydrophobicity for CO₂ separation. *Separation and Purification Technology*, 342(126922), 126922. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126922>

Peng, L., Shi, M., Zhang, X., Xiong, W., Hu, X., Tu, Z., & Wu, Y. (2022). Facilitated transport separation of CO_2 and H_2S by supported liquid membranes based on task-specific protic ionic liquids. *Green Chemical Engineering*, 3(3), 259. doi:10.1016/j.gce.2021.12.005

Qin, Z., Feng, X., Yin, D., Xin, B., Jin, Z., Deng, Y., . . . Dai, Z. (2023). Impact of humidity on the CO_2/N_2 separation performance of pebax-MOF mixed matrix membranes American Chemical Society (ACS). doi:10.1021/acs.iecr.3c02308

Ren, Y., He, D., Wang, T., & Qi, H. (2023). Effect of ZIF-7 doping content on H_2/CO_2 separation performance of 1,2-bis(triethoxysilyl)ethane-derived organosilica membranes. *Separation and Purification Technology*, 311(123347), 123347. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123347>

Rinberg, A., & Aziz, M. J. (2024). Bicarbonate-carbonate selectivity through nanofiltration for direct air capture of carbon dioxide. *ACS ES&T Engineering*, 4(8), 1959–1969. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.4c00150>

Roca, R. (2022) “UNA MEMBRANA PERMITE UNA MEJOR CAPTURA DEL CO_2 DE LAS CENTRALES TÉRMICAS” El periódico de la energía. Recuperado de <https://elperiodicodelaenergia.com/una-membrana-permite-una-mejor-captura-del-co2-de-las-centrales-termicas/>

Sanders, K., et al. (2013). Membrane processes in CO₂ capture: A review of current technology. *Separation and Purification Technology*, 103, 53-63. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.10.011>

Sanders, D. F., Smith, Z. P., Guo, R., et al. (2013). Energy-efficient polymeric gas separation membranes for a sustainable future: A review. *Polymer*, 54(18), 4729–4761. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.05.075>

Shi, B., Wang, J., Liao, Q., Wang, T., Wang, S., Yang, M., . . . Gong, J. (2021). Simulation of multi-method CO₂ capture and purification process. *Natural Gas Industry B*, 8(5), 464. doi:10.1016/j.ngib.2021.08.005

Shi, Y., Liang, J., Babu Shrestha, B., Wang, Z., Zhang, Y., & Jin, J. (2022). Enhancing the CO₂ plasticization resistance of thin polymeric membranes by designing metal-polymer complexes. *Separation and Purification Technology*, 289 doi:10.1016/j.seppur.2022.120699

Shi, Y., Ni, R., & Zhao, Y. (2023). Review on Multidimensional Adsorbents for CO₂ Capture from Ambient Air: Recent Advances and Future Perspectives. *Energy & Fuels*, 6365–6381. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c00381>

Song, C., Run, L., Liu, Q., Deng, S., Li, H., & Sun, J. (2024). Membrane-cryogenic hybrid CO₂ capture—A review. *Carbon Capture Science & Technology*, 13(100249), 100249. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100249>

Sun, H., Zhao, S., Niu, Y., Wang, K., Xu, Z., Wei, B., Li, P., & Hou, Y. (2024). Facile surface amination strategy of PIM-1 based membranes for efficient CO₂ capture. *Separation and Purification Technology*, 331(125643), 125643. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125643>

Sun, J., Wang, Y., Liu, J., Xu, Q., & Yin, J. (2020). Highly selective separation of CO₂/N₂ using [emim][Tf₂N] supported ionic liquid membranes prepared by supercritical fluid deposition. *The Journal of Supercritical Fluids*, 170 doi:10.1016/j.supflu.2020.105139

Sun, W., Yin, M., Zhang, W., Li, S., Wang, N., & An, Q. (2021). Green techniques for rapid fabrication of unprecedentedly high-performance PEO membranes for CO₂ capture. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(30), 10167. doi:10.1021/acssuschemeng.1c02308

Sun, W., Yin, M., Zhang, W., Li, S., Wang, N., & An, Q. (2022). Tailor-made microstructures lead to high-performance robust PEO membrane for CO₂ capture via green fabrication technique. *Green Energy & Environment*, 8(5), 1389. doi:10.1016/j.gee.2022.01.016

- Swati, I. K., Sohaib, Q., Cao, S., Younas, M., Liu, D., Gui, J., & Rezakazemi, M. (2020). Protic/aprotic ionic liquids for effective CO₂ separation using supported ionic liquid membrane. *Chemosphere*, 267 doi:10.1016/j.chemosphere.2020.128894
- Teh, J. Y., & Yong, W. F. (2024). Recent advances in H₂ purification and CO₂ capture: Evolving from flat sheet to hollow fiber membranes. *Carbon Capture Science & Technology*, 13(100334), 100334. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100334>
- Tian, L., Sun, Y., Guo, X., Qiao, Z., & Zhong, C. (2021). Metal-organic framework based mixed matrix hydrogel membranes for highly efficient gas separation. *Advanced Membranes*, 1 doi:10.1016/j.advmem.2021.100009
- TT Consultants. (2023). The future of CO₂ capture: Patent landscape, market dynamics, and technological innovations. Recuperado de <https://es.ttconsultants.com/the-future-of-co2-capture-patent-landscape-market-dynamics-and-technological-innovations>
- Tu, Z., Liu, P., Zhang, X., Shi, M., Zhang, Z., Luo, S., . . . Hu, X. (2021). Highly-selective separation of CO₂ from N₂ or CH₄ in task-specific ionic liquid membranes: Facilitated transport and salting-out effect. *Separation and Purification Technology*, 254 doi:10.1016/j.seppur.2020.117621

Tuset, S. (2019, septiembre 26). *Filtración mediante membranas cerámicas para el tratamiento de aguas*. Condorchem Enviro Solutions.

<https://condorchem.com/es/blog/membranas-ceramicas-tratamiento-efluentes/>

"UN AÑO MÁS, LAS CONCENTRACIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO VOLVIERON A BATIR TODOS LOS RÉCORDS". (2021). ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL. Recuperado de <https://wmo.int/es/media/un-ano-mas-las-concentraciones-de-gases-de-efecto-invernadero-volvieron-batir-todos-los-records>. o Global Carbon Project (2020). Global Carbon Budget 2020. Retrieved from <https://www.globalcarbonproject.org/>

UNAV (2020). BiblioGuías: Revisiones sistemáticas: Definición: ¿qué es una revisión sistemática? <https://biblioguias.unav.edu/revisionessistematicas/que-es-una-revision-sistematica>

Valencia Arias, A., Rodríguez-Correa, P. A., Ramón Ruffner de Vega, J. G., Benjumea-Arias, M., & Oré León, A. J. A. (2023). Adopción de Tecnologías Verdes en el Sector Industrial: una Revisión Sistemática de la Literatura. *Rev. Téc. Fac. Ing. Univ. Zulia*, 46, e234608. <https://doi.org/10.22209/rt.v46a08>

- Valluri, S., & Kawatra, S. K. (2021). Reduced reagent regeneration energy for CO₂ capture with bipolar membrane electrodialysis. *Fuel Processing Technology*, 213(106691), 106691. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106691>
- Voon, B. K., Shen Lau, H., Liang, C. Z., & Yong, W. F. (2022). Functionalized two-dimensional g-C₃N₄ nanosheets in PIM-1 mixed matrix membranes for gas separation. *Separation and Purification Technology*, 296 doi:10.1016/j.seppur.2022.121354
- Wang, H., Ding, Y., Ning, M., Yu, M., Zheng, W., Ruan, X., . . . He, G. (2023). Amino-functional CPL-1 with abundant CO₂-philic groups to enhance MMM-based CO₂ separation. *Separation and Purification Technology*, 322 doi:10.1016/j.seppur.2023.124227
- Wang, H., Zheng, W., Yang, X., Ning, M., Li, X., Xi, Y., . . . He, G. (2021). Pebax-based mixed matrix membranes derived from microporous carbon nanospheres for permeable and selective CO₂ separation. *Separation and Purification Technology*, 274 doi:10.1016/j.seppur.2021.119015
- Wang, Y., Niu, Z., Dai, Y., Zhong, S., & Li, J. (2023). Efficient CO₂ separation by ionic liquid nanoconfined in ultra-thin TCOH@Pebax-1657 MMM. *Separation and Purification Technology*, 325 doi:10.1016/j.seppur.2023.124667

Wang, Y., Ren, Y., Cao, Y., Liang, X., He, G., Ma, H., . . . Jiang, Z. (2023a). Engineering HOF-based mixed-matrix membranes for efficient CO₂ separation Springer Science and Business Media LLC. doi:10.1007/s40820-023-01020-w

Wang, Y., Zhao, J., Zhang, S., Zhang, Z., Zhu, Z., Wang, M., . . . Jiang, Z. (2023b). Two-step fabrication of COF membranes for efficient carbon capture. *Materials Horizons*, 10(11), 5016. doi:10.1039/d3mh00981e

Wang, Y., Zhou, Y., Zhang, X., Gao, Y., & Li, J. (2021). SPEEK membranes by incorporation of NaY zeolite for CO₂/N₂ separation. *Separation and Purification Technology*, 275 doi:10.1016/j.seppur.2021.119189

Wang, Z., Sun, W., Zhang, W., Li, S., Yin, M., & An, Q. (2023a). Construction of high-performance thin-film composite membrane for CO₂ separation via interface engineering. *Separation and Purification Technology*, 322 doi:10.1016/j.seppur.2023.124348

Wang, Z., Zhang, W., Yu, G., Yin, M., Li, S., & An, Q. (2023b). Defect-free PEO membrane fabrication by hydrogen bonding coupling thermal annealing for carbon capture. *Chemical Engineering Science*, 282 doi:10.1016/j.ces.2023.119354

Wei, J., Ma, Y., Qin, Z., Jin, Z., Jin, Y., Yang, L., . . . Dai, Z. (2023). Membrane fabricated via a facile non-solvent induced microstructure re-arrangement with superior CO₂ separation performances. *Separation and Purification Technology*, 320 doi:10.1016/j.seppur.2023.124182

Woo, S., Hong, J., Lee, J., Choi, M., Jung, S., & Kang, S. W. (2024). Highly CO₂-selective membranes composed of Quaternary ammonium functionalized silica nanoparticles. *Energy and fuels*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4336609>

Wu, W., Fan, J., Wang, D., Zhao, Y., Zhao, X., & Wei, Y. (2024). Ultrathin UiO-66-NH₂ polycrystalline membrane for CO₂/CH₄ separation. *Carbon Capture Science & Technology*, 11 doi:10.1016/j.ccest.2023.100183

Wu, Y., Xie, S., & Chen, D. (2022). Development of polymeric membranes for CO₂ capture: A review of material innovations. *Journal of Membrane Science*, 646, 120110. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.120110>

Xiao, Y. H., Xu, H. J., & Zhao, C. Y. (2021). Modeling the mass transfer process in membranes for carbon capture and separation with concentration polarization effect. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 126 doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105396

Xiao, Y., Li, A.-R., Li, B., Li, M., Yao, H., & Wang, Z. (2024). Energy consumption and economic analysis of CO₂ capture from flue gas by membrane separation coupled with hydrate method. *Energy (Oxford, England)*, 312(133471), 133471. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133471>

Xu, H., Xiao, Y., Yu, G., He, Z., & Hai, Z. (2024). Molecular dynamics study on transport process of membrane separation for carbon dioxide capture. *Computational Materials Science*, 244(113233), 113233. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2024.113233>

Xu, J., Zhao, W., Xu, S., Cao, Q., Zhang, M., Qu, Y., Geng, C., Jia, H., & Wang, X. (2025). Convenient preparation of inexpensive sandwich-type poly(vinylidene fluoride)/molecular sieve/ethyl cellulose mixed matrix membranes and their effective pre-exploration for the selective separation of CO₂ in large-scale industrial utilization. *Separation and Purification Technology*, 354(129154), 129154. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129154>

Xu, P., Zhang, X., Zhao, L., Wang, Z., Liu, Y., Bai, L., & Liu, Z. (2023). Prominently improved CO₂/N₂ separation efficiency by ultrathin-ionic-liquid-covered MXene membrane. *Separation and Purification Technology*, 311. doi:10.1016/j.seppur.2023.123296

- Xu, W., Lindbråthen, A., Janakiram, S., Ansaloni, L., Lei, L., & Deng, L. (2023). Membrane process design for biohydrogen purification with simultaneous CO₂ capture: Feasibility and techno-economic assessment. *Chemical Engineering Science*, 282 doi:10.1016/j.ces.2023.119219
- Xue, K., Fu, H., Chen, H., Zhang, H., & Gao, D. (2023). Investigation of membrane wetting for CO₂ capture by gas–liquid contactor based on ceramic membrane. *Separation and Purification Technology*, 304(122309), 122309. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122309>
- Yan, F., Guo, Y., Wang, Z., Zhao, L., & Zhang, X. (2022). Efficient separation of CO₂/CH₄ by ionic liquids confined in graphene oxide: A molecular dynamics simulation. *Separation and Purification Technology*, 289 doi:10.1016/j.seppur.2022.120736
- Yan, M., Zhang, Y., Grisdanurak, N., Wibowo, H., Yu, C., & Kanchanatip, E. (2022). CO₂ adsorption on cu-BTC to improve the quality of syngas produced from supercritical water gasification. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(15), 14049. doi:10.1007/s13399-021-02194-2
- You, L., Guo, Y., He, Y., Huo, F., Zeng, S., Li, C., . . . Zhang, X. (2021). Molecular level understanding of CO₂ capture in ionic liquid/polyimide composite membrane Springer Science and Business Media LLC. doi:10.1007/s11705-020-2009-7

Yu, Z. , Guo, Z. , Yu, L., Feng, X. , Wang, B. (2024). Polyethylene Glycol-Mediated High-Performance Mixed Matrix Membranes via a “Nesting Effect” for CO₂ Separation. *ACS Applied Polymer Materials*, 6(9), 5443–5451.

Yu, C., Lu, C., Wang, X., Zhou, W., Yang, Z., Yu, X., ... & Lin, R. (2023). Simulation study of mass transfer characteristics of CH₄/CO₂ separation in multiple types of covalent organic framework membrane materials. *American Chemical Society (ACS)*. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c01730>

Zeng, S., Liu, Z., Zhao, H., Yang, T., Dong, X., & Du, Z. (2021). A chemically stable La_{0.2}Sr_{0.8}Fe_{0.9}Mo_{0.1}O_{3-δ}-molten carbonate dual-phase membrane for CO₂ separation. *Separation and Purification Technology*, 280 doi:10.1016/j.seppur.2021.119970

Zhang, C., Sheng, M., Hu, Y., Yuan, Y., Kang, Y., Sun, X., . . . Wang, Z. (2021). Efficient facilitated transport polymer membrane for CO₂/CH₄ separation from oilfield associated gas. *Membranes*, 11(2) doi:10.3390/membranes11020118

Zhang, D., Zhang, C., Zhang, X., Tian, Y., Cheng, X., Zhu, X., & Wang, L. (2025). Efficient Low-Pressure CO₂ capture via ZIF-8 modified by deep eutectic solvents. *Separation and Purification Technology*, 353(128359), 128359. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128359>

Zhang, J., Zhao, Q., Wang, S., & Tan, X. (2022). Direct capture of low concentration CO₂ using tetraethylenepentamine-grafted polyacrylonitrile hollow fibers. *Separation and Purification Technology*, 287 doi:10.1016/j.seppur.2022.120562

Zhang, L., Ni, R., Shi, H., Tian, G., Hu, W., Reddy, N., Zhao, Y., & Zhao, Y. (2025). Hierarchically fibrillated spunlaced nonwovens from waste wool supported ionic liquid as solid amine adsorbents for CO₂ capture. *Separation and Purification Technology*, 357(130025), 130025. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130025>

Zhang, L., Ni, R., Shi, H., Tian, G., Hu, W., Reddy, N., Zhao, Y., & Zhao, Y. (2025). Hierarchically fibrillated spunlaced nonwovens from waste wool supported ionic liquid as solid amine adsorbents for CO₂ capture. *Separation and Purification Technology*, 357(130025), 130025. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130025>

Zhang, M., Chen, L., Yuan, Z., Semiat, R., & He, X. (2023). CO₂-philic imidazolium-based poly(ionic liquid) composite membranes for enhanced CO₂/N₂ separation. *American Chemical Society (ACS)*. doi:10.1021/acs.iecr.3c01083

Zhang, M., Semiat, R., & He, X. (2022). Recent advances in poly(ionic liquids) membranes for CO₂ separation. *Separation and Purification Technology*, 299 doi:10.1016/j.seppur.2022.121784

- Zhang, P., Sun, H., Sun, Q., Dong, Y., Zhang, Y., Li, R., Feng, G., Wang, R., Lian, S., Wang, Y., & Song, C. (2025). Preparation of Pebax based ternary mixed matrix membranes for enhancing CO₂ transport and separation. *Separation and Purification Technology*, 355(129607), 129607. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129607>
- Zhao, M., Ban, Y., Yang, K., Zhou, Y., Cao, N., Wang, Y., & Yang, W. (2021). A highly selective supramolecule array membrane made of Zero-Dimensional molecules for gas separation Wiley. doi:10.1002/anie.202108185
- Zhao, M., Guo, J., Xin, Q., Zhang, Y., Li, X., Ding, X., . . . Zhang, Y. (2023). Novel aminated F-ce nanosheet mixed matrix membranes with controllable channels for CO₂ capture. *Separation and Purification Technology*, 324 doi:10.1016/j.seppur.2023.124512
- Zhao, Q., Lian, S., Li, R., Yang, Y., Zang, G., & Song, C. (2023). Fabricating Leaf-like hierarchical ZIF-67 as Intra-Mixed matrix membrane microarchitecture for efficient intensification of CO₂ separation. *Separation and Purification Technology*, 305(122460), 122460. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122460>
- Zhao, T., Wei, Y., Wang, J., Wang, Q., Chen, Y., Liu, X., & Zhao, Y. (2023). Microporous carbon coated zeolite particles for efficient carbon capture from wet flue gas. *Separation and Purification Technology*, 317(123762), 123762. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123762>

- Zhao, Y., Wei, Z., & Chen, X. (2021). Inorganic membranes for CO₂ separation: Recent advances and future perspectives. *Journal of CO₂ Utilization*, 43, 101315. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101315>
- Zhao, Y., Yang, X., Luo, J., Wei, Y., & Wang, H. (2022). Porous stainless steel hollow fiber-supported ZIF-8 membranes via FCDS for hydrogen/carbon dioxide separation. *Separation and Purification Technology*, 295 doi:10.1016/j.seppur.2022.121365
- Zheng, W., Liu, Z., Ding, R., Dai, Y., Li, X., Ruan, X., & He, G. (2021). Constructing continuous and fast transport pathway by highly permeable polymer electrospun fibers in composite membrane to improve CO₂ capture. *Separation and Purification Technology*, 285 doi:10.1016/j.seppur.2021.120332
- Zheng, W., Tian, Z., Wang, Z., Peng, D., Zhang, Y., Wang, J., & Zhang, Y. (2021). Dual-function biomimetic carrier based facilitated transport mixed matrix membranes with high stability for efficient CO₂/N₂ separation. *Separation and Purification Technology*, 285 doi:10.1016/j.seppur.2021.120371
- Zhou, J., Wu, S., Liu, B., Zhou, R., & Xing, W. (2022). Scalable fabrication of highly selective SSZ-13 membranes on 19-channel monolithic supports for efficient CO₂ capture. *Separation and Purification Technology*, 293 doi:10.1016/j.seppur.2022.121122

Zhu, B., He, S., Wu, Y., Li, S., & Shao, L. (2022). One-step synthesis of structurally stable *CO*₂-philic membranes with ultra-high PEO loading for enhanced carbon capture. *Engineering (Beijing, China)*. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.03.016>

APÉNDICES

Apéndice A. Membranas poliméricas

MATERIALES	TÉCNICA UTILIZADA	CONDICIONES DE OPERACIÓN	RENDIMIENTO Y SELECTIVIDAD	PERMEABILIDAD	FUENTE
Bisfenol A etoxilato diacrilato (BPA), PEGMEA, PEGDME	Separación por diferencias de solubilidad y difusión	35°C y 0,35 MPa de presión	Alta permeabilidad potencial en aplicaciones industriales. Proceso de fabricación rápido y de bajo consumo energético	Alta eficiencia con proceso rápido y ecológico	(<i>sun et al. 2021</i>)
Celulosa, ZIF-8, polietilenimina	Adsorción química con aminas	298K, presión atmosférica	Aumento del 230% en área específica de adsorción. Selectividad de 9.26 mmol/g de adsorción de CO ₂		(<i>Chen et al. 2024</i>)
Polímero con grupos amina	Transporte facilitado	5 bar, 57°C, 15% CO ₂ en la alimentación	Captura de hasta 80% CO ₂ . Alta selectividad CO ₂ /N ₂ Capacidad de adsorción de CO ₂ de 11.75 mmol/g, manteniendo el 95.2% tras 12 ciclos. Adsorción selectiva de CO ₂ en estructuras fibriladas	Alta permeabilidad para CO ₂	(<i>Li et al. 2023</i>)
Fibra de lana reciclada con líquidos iónicos de aminas	Adsorción química con soporte sólido	80°C, ciclos de adsorción/desorción con gas CO ₂ puro		Alta carga de Líquido Iónico de Aminoácidos (AIL) (13.53%) en la estructura porosa	(<i>Zhang et al. 2025</i>)
Polietileno Oxidado con Trehalosa	Separación de gases	35 °C y 3.5 bar	Alta estabilidad a largo plazo. CO ₂ /N ₂ con alta selectividad	Mejora con presión, pero suprimida por efecto de plastificación	(<i>Wang et al. 2023</i>)

Matrimid optimizado con LiCl	Separación de gases con transporte facilitado	57°C, presión diferencial de 115.1 kPa	Permeabilidad de CO ₂ de 932 GPU. Selectividad 158 CO ₂ /N ₂	2.60 × 10 ⁵ GPU para el sustrato de Matrimid	(Pang et al. 2023)
Membrana de primera generación de MTR (espiral enrollada)	Separación de CO ₂ en dos etapas con reciclaje	40 °C, presión de alimentación 134-143 kPa, presión de vacío 21-51 kPa	70 % de captura de CO ₂ con 75 % de pureza en el gas capturado. Selectividad CO ₂ /N ₂ : 50	Permeabilidad de CO ₂ : 1000 GPU	(Cui et al. 2021)
PIM-1 con modificación amina	Adsorción por grupos amina	Presión ambiente, 298 K	Optimizado con tratamiento con metanol. Selectividad de 34.1	11421.5	(Sun et al. 2024)
DIL:[C4mim][Tf2N] (1:2)	Separación de CO ₂ /N ₂ y CO ₂ /CH ₄	3 bar, 20°C	Supera la barrera de Robeson. Selectividad de CO ₂ /N ₂ : 68.1, CO ₂ /CH ₄ : 85.1	40.3 barrer	(Zhang et al. 2022)
BPA (bisfenol A etoxilado diacrilato) + PEGMEA (polietilenglicol metil éter acrilato)	Fotopolimerización UV para entrecruzamiento	35 °C, 15 atm, operación continua de 100 h	Alta estabilidad mecánica y térmica. CO ₂ /N ₂ : 44	CO ₂ : 1711 Barrer	(Sun et al. 2023)
Poliimida carbonizada resistente a contaminantes.	Difusión facilitada en membrana de fibra hueca.	50 °C	Membrana robusta ante contaminantes industriales. CO ₂ /N ₂ = 20, con buena resistencia a impurezas.	660 GPU de CO ₂ a 50 °C, (permeabilidad evaluada bajo SO ₂ y Nox)	(Liu et al. 2021)
Polímero microporoso intrínseco (PIM) con esqueleto de carbono y grupos funcionales -OH y -NO ₂	Polimerización por condensación Friedel-Crafts	35 °C, 2 bar, operación continua	Alta estabilidad térmica y resistencia al envejecimiento. CO ₂ /CH ₄ : 20	52.3 barrer	(Weng et al. 2021)
Polivinilamina (PVAm), sales de	Transporte facilitado con aminas	35°C, 2 bar	Alta capacidad de separación. Selectividad de 48 CO ₂ /N ₂	160	(Li Y et al. 2023)

aminoácidos, celulosa NC					
Polímero vítreo modificado con MOFs (UiO, MIL, ZIF)	Interfaz de polimerización y dip-coating	Presión 2-10 bar, temp. 30-70 °C	Supera la barrera de Robeson en algunos casos. CO_2/CH_4 : 29, H_2/CH_4 : 34.4, H_2/N_2 : 23.8	CO_2 : 2494 Barrer, H_2 : 2932 Barrer	(Yi et al. 2024)
Polímero de alto volumen libre PTMSP con matriz de PEO	Electrohilado de fibras PTMSP seguido de polimerización in-situ de PEO	25 °C, 0.3 MPa	Permeabilidad de CO_2 281 Barrer, 280 % mayor que PEO puro. CO_2/N_2 : 32.94	CO_2 : 281 Barrer	(Zheng et al. 2023)

Apéndice B. Membranas inorgánicas.

MATERIALES	TÉCNICA UTILIZADA	CONDICIONES DE OPERACIÓN	RENDIMIENTO Y SELECTIVIDAD	PERMEABILIDAD	FUENTES
Cerámica modificada con silanos (n-dodecyltrimetoxisilano o hexadeciltrimetoxisilano)	Absorción química con [TEPA][MIm] y adsorción física con ZIF-8	Presión: 0.1-1.0 L/min de flujo de gas, Temperatura: 25 °C, CO ₂ /N ₂ C: 15-16 % CO ₂	Captura de CO ₂ de 1.82 mol CO ₂ /mol absorbente. Captura de CO ₂ del 90.4 %	No reportada directamente, pero con alta eficiencia de captura	(Li et al. 2025)
Aluminio, silicio y oxígeno	Adsorción por intercambio iónico y tamaño de poro	Alta estabilidad térmica hasta 900 °C	Buena estabilidad a largo plazo. Selectividad moderada, dependiente del tipo de zeolita	Media, dependiente del tipo de zeolita	(Shi et al. 2023)
Carbono activado derivado de biomasa o coque	Adsorción física basada en interacciones de Van der Waals	Amplio rango de presión y temperatura	Alta reciclabilidad, pero la eficiencia depende del tamaño del poro. Selectividad variable, mejora con funcionalización	Variable, optimizable con modificación superficial	(Shi et al. 2023)
Cerámica (Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , ZrO ₂) y PTFE	Contactores de membrana gas-líquido con absorción química	Poro de 10 nm y 100 nm, absorbente MEA, flujo de gas 2.5-18.1 L/min	Mayor eficiencia en PTFE, pero menor tasa de transferencia. Selectividad PTFE: 99.3 %, Cerámica: 94.7 %	Mayor tasa de transferencia en cerámica	(Fu et al. 2023)
Grafeno oxidado, líquidos iónicos (C4mimBF ₄ , NTf ₂ , PF ₆)	Membranas con canales nanoestructurados para separación CO ₂ /H ₂	Pruebas a 0.5 bar de presión diferencial	Mejor desempeño con líquidos iónicos de cadenas más cortas. CO ₂ /H ₂ : 13.58 (supera la barrera de Robeson)	13.85 GPU para CO ₂ en membranas con C1mimBF ₄	(Dong et al. 2025)

membrana compuesta de carbonato fundido y conductor iónico-electronico de oxigeno mixto	Transporte iónico con carbonato	T=750 °C, t=50 h, P=1 atm, corriente 50 CO ₂ y 50 N ₂ alimentación. He puro para barrido	Alta movilidad de iones. Optimización en separación	83.1 kJ/mol	(Zeng et al. 2021)
Matriz cerámica porosa	Adsorción con cerámicas	60 C y 10 bar	Optimización en adsorción de CO ₂ . CO ₂ /N ₂ : 62.3	600 GPU	(Nilkar et al. 2023)
Mullita, α-Al ₂ O ₃ , ZIF-8, PDMS	Difusión selectiva de CO ₂ a través de PDMS/ZIF-8	Presión 0.2 MPa, temperatura 80 °C	Alta estabilidad y retención de CO ₂ . Selectividad 10.07 GPU	3050 - 4756 GPU	(Fu et al. 2025)
Polivinilamina (PVAm), sales de aminoácidos, celulosa NC	Transporte facilitado con aminas	35 °C, 2 bar	Alta capacidad de separación. CO ₂ /N ₂ : 48	160 GPU	(Li et al. 2023)
Polímero con nanopartículas metálicas	Transporte facilitado con interacciones metálicas	42 °C y 6 bar	Separación avanzada con metales. CO ₂ /N ₂ CO ₂ /N ₂ : 57.1	510 GPU	(Xu et al. 2023)
MOF basado en Ni con ligandos tetrazolato y 4,4'-bipiridina.	Adsorción selectiva de CO ₂ en sitios activos N-Ni-F ⁻ junto con tamizado molecular.	Pruebas a 298 K y 1 bar, con estudios de adsorción hasta 110 kPa.	Alta adsorción de CO ₂ gracias a interacciones con sitios tetrazolato-Ni-F ⁻ . H ₂ /CO ₂ : 14.43	Con permeabilidad de H ₂ de 1.59 × 10 ⁵ Barrer.	(Hou et al. 2023)
Nanocompuestos con relleno inorgánico	Tamizado molecular	50 °C, 10 bar, pruebas de estabilidad	Separación eficiente en procesos industriales. CO ₂ /N ₂ : 52.1, CO ₂ /CH ₄ : 48.3	510 GPU para CO ₂	(Huang et al. 2023)
Óxido de grafeno en matriz polimérica	Transporte facilitado con óxido de grafeno	45 °C y 5 bar	Optimización de selectividad y estabilidad. CO ₂ /CH ₄ : 50,1	360 GPU	(Chen et al. 2023)

Zeolita CHA (SSZ-13) con tungsteno	Difusión selectiva mediante control de hidrofobicidad	298 K, bajo condiciones secas y húmedas	Mejora en permeabilidad y estabilidad frente al agua. CO_2/N_2 : 16.9 y CO_2/CH_4 : 176	Alta permeabilidad controlada por dopaje de W (incorporación de tungsteno (W) en una matriz de material)	(Peng et al. 2024)
Zeolita SSZ-13 en soportes cerámicos monolíticos	Tamizado molecular mediante poros de $3.8 \text{ \AA} \times 3.8 \text{ \AA}$	298 K, presión de 0.2 MPa, mezcla CO_2/CH_4 y CO_2/N_2 equimolar	Mejorada con soporte monolítico de alta densidad. CO_2/CH_4 : 132, CO_2/N_2 : 46	$464 \times 10^{-9} \text{ mol}/(\text{m}^2 \text{ s Pa})$	(Zhou et al. 2022)
ZIF-8 sobre fibra hueca de acero inoxidable poroso modificada con polidopamina (PDA).	Tamizado molecular con estructuras rígidas de ZIF-8 modificadas por campo eléctrico.	Pruebas a temperatura ambiente, presión de 1 bar, corriente de 0.76 mA/cm ² .	Mejorada mediante modificación con PDA para favorecer la nucleación homogénea de ZIF-8. H_2/CO_2 : 14,	Permeancia de H_2 de $1.9 \times 10^{-10} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$.	(Zhao et al. 2022)

Apéndice C. Membranas compuestas o híbridas.

MATERIALES	TÉCNICA UTILIZADA	CONDICIONES DE OPERACIÓN	RENDIMIENTO Y SELECTIVIDAD	PERMEABILIDAD	FUENTE
Pebax con Ni	Transporte facilitado	25 °C a 80 °C y presión atmosférica	Rendimiento 80 % y selectividad de 54.2 %	286 - 313 Barrer	Xu et al. (2025)
Polímeros (PVDF y etilcelulosa)	Separación por membrana mixta	27 °C - 80 °C y presión ambiente	Rendimiento de 90 % y selectividad de 21, 85 %	891.23 Barrer	Dong et al. (2025)
Pebax con COF	Difusión a través de la membrana	27 °C y 2 bar	Rendimiento de 73.40 % y selectividad de 28.31 %	813.5 Barrer	Liang et al. (2025)
ZIF - 8	Adsorción física	25 a 50 °C y 2 bar	Rendimiento estable y selectividad de 97.5 %	403 Barrer	Zhang et al. (2025)
Zirconio	Adsorción física	25 °C y 1 bar	Rendimiento estable y selectividad alta	Permeabilidad alta	Menezes et al. (2025)
Pebax on NH ₂	Filtración a través de la membrana	45 a 65 °C y 100 bar en ambiente húmedo	Rendimiento estable y selectividad aumenta el 220 % comparado con el Pebax puro	210 Barrer	Yu et al. (2024)
Pebax con Ni	Separación por adsorción	25 a 50 °C y 1 bar	Rendimiento alto y selectividad de 76.96 %	Variable	Tu et al. (2021)
MOF 808 con PVAm	Transporte facilitado	160 °C y 1 bar	Rendimiento alto y selectividad de 81 %	2753 Barrer	Ge et al. (2024)
PIM - 1 con Zn	Transporte facilitado	Mezcla de CO ₂ /N ₂ (15/85) a 2 bar 5 wt% de carga de Zn - SiF ₆	Rendimiento del 95 % y selectividad de 26,3 %	6268 Barrer	Peng et al. (2024)
PES modificado con TiO ₂	Contactores de membrana	25 a 50 °C y baja presión	El rendimiento depende de la estabilidad	Alta, mejorada con diseño poroso	Lin et al. (2023)

GLMC			estructural y presenta selectividad alta, optimizable con modificación química		
Organosilica con ZIF - 7	Difusión selectiva	Flujo de gas de 30 mL/min, DEA 16 L/h	Rendimiento de 99,4 % y selectividad de 110 %	10.096 x 10 ⁻³ mol/m ² s	Lin et al. (2023)
Pebax 2533 con MOFs	Difusión selectiva	273 K	Rendimiento depende de la carga de ZIF - 7 y selectividad de 21.7 %	539 Barrer	Ren et al. (2023)
Pebax 1657 con ZIF - 67	Separación basada en arquitectura porosa	208 a 273 K	Rendimiento de 74.1 % y selectividad de 24.69 %	91.6 Barrer	Feng et al. (2023)
PVA y PSF	Difusión de membranas	22 a 50 °C y 1.8 a 5 bar	Rendimiento mejorado al 200 % respecto a PSF y selectividad de 51.8 %	Varía con P y T	Zhao et al. (2023)
PVDF	Interacciones ácido - base	Presión de 1,8 a 5 bar y temperatura de 22 a 50 °C	Rendimiento alto y selectividad de 78 %	Mayor transporte de CO ₂	Li et al. (2023)
MOF con CFA - 1	Transporte facilitado	Condiciones de gases mixtos	Rendimiento alto y selectividad CO ₂ /N ₂ de 87.76 % CO ₂ /CH ₄ de 75.31 %	Mayor estabilidad en enzimas naturales	Dong et al. (2023)
MOF de lantánidos	Tamizado molecular	25 a 55 °C y 10 bar	Rendimiento alto y selectividad CO ₂ /N ₂ de 88.6 %	Alta	Zheng et al. (2021)
PVAm/Matrimid	Transporte facilitado	Alta adsorción de CO ₂	Rendimiento alto y selectividad CO ₂ /N ₂ de 48.45 % CO ₂ /CH ₄ de 54,67 %	Alto	Guo et al. (2021)
PES modificado	Contacto gas - líquido	30 °C y 1 bar	Incremento significativo en selectividad CO ₂ /N ₂ de 133.6 %	Alto	Aframe Hr et al. (2022)

Pebax con ZIF - 8	Separación	25 °C y 1 bar	CO ₂ /CH ₄ de 267,3 % Aumento de eficiencia con ZIF - 8, incremento del 118.8 %	Incremento del 80.6 %	Lin et al. (2020)
Torlon	Separación por tamaño molecular y adsorción selectiva	35,65 °C	Rendimiento modificable según carga de ZIF - 8 y temperatura. Selectividad mejorada con aumento de temperatura Mayor eficiencia de adsorción.	13 GPU área de permeación de 1.13 cm ²	Jiao et al. (2020)
Fumarato de aluminio	Transporte facilitado	Condiciones ambiente	Mejora de 3x en la permeabilidad de He con 25 % ZIF - 8.	Mayor permeabilidad con aumento de temperatura	De Pascale et al. (2021)
PSF reforzado con red SNW - 3	Adsorción y separación mejorada por plasticización	31,8 atm	Transporte facilitado mejorado y selectividad de CO ₂ /N ₂ optimizado	Alta permeabilidad	Yu et al. (2024)
Matriz de poliamida con partículas de sílice	Transporte facilitado	35 °C y 5 bar	Plástico resistente al envejecimiento por CO ₂	Aumento del 400% en permeabilidad de CO ₂	Liu et al. (2022)
MOF con soporte polimérico	Adsorción en MOF	40 °C y 31,8 atm de presión de plasticization	Aumento del 75 % en eficiencia de separación y selectividad CO ₂ /N ₂ de 45.2 %	350 GPU	Wu et al. (2024)
MOF con soporte polimérico	Adsorción en MOF	35 °C y 5 bar, flujo de gas continuo	Incremento del 85 % en captura de CO ₂ y selectividad CO ₂ /N ₂ de 60 %	420 GPU	Yu et al. (2023)
ZIF - 8 con polímero PVA	Tamizado molecular y transporte facilitado	40 °C y 7 bar	Incremento del 75 % en eficiencia de separación y selectividad CO ₂ /N ₂ de 55.2 %	400 GPU	Yan et al. (2023)
Pebax 1657	Separación	30 °C y 2 bar	Alta estabilidad	Se redujo sólo en 0.6	Lian et al.

con solventes eutécticos	por diferencias de solubilidad y absorción		térmica y química del material. Selectividad CO_2/N_2 de 50,5 %, siendo 17 % mayor que el Pebax estándar	% respecto a Pebax sin aditivos	(2021)
Compuestas con ingeniería de interfaz	Transporte facilitado	35 °C y 6 bar	Optimización de selectividad y estabilidad. Selectividad CO_2/CH_4 de 47.9 %	380 GPU	Wang et al. (2023)
COF estructurado por síntesis escalonada	Difusión selectiva	35 °C y 3 bar	Aplicación en captura avanzada de CO_2 y selectividad de CO_2/N_2 de 57.3 %	430 GPU	Wang et al. (2023)
Cerámica y PTFE	Contactores de membranas GLMC	Poros de 10 nm a 100 nm, flujo de gas de 2.5 a 18.1 L/min	Rendimiento optimizado con flujo de absorbente y temperatura. Selectividad con PTFE de 99.3 % y con cerámica de 94.7 %	Mayor tasa de transferencia en cerámica	Fu et al. (2023)
Polivinilalcohol y polisulfona	Difusión con membranas compuestas	22 a 50 °C y 1.8 a 5 bar	Rendimiento ajustable mediante la relación PVA/PSF. Selectividad de CO_2/N_2 de 78 % a 27.1 % (según la temperatura)	CO ₂ permeabilidad varía con presión y temperatura	Li et al. (2023)
Pebax 1657 con nanoesferas de carbono microporoso	Transporte facilitado	25 a 80 °C y 0.2 a 1 MPa	Microporos con alta afinidad para el CO ₂ . Selectividad CO_2/N_2 mejorada en 39.51 % comparado con pebax estándar.	Mayor permeabilidad gracias a nanoporos en las nanoesferas de carbono	Wang et al (2021)
Combinación de líquidos iónicos y confinados	Difusión selectiva	Simulación a 298 K, presión de 0.2 MPa, variando el	Alta estabilidad y rendimiento mejorado con líquidos iónicos	Dependiente del líquido iónico utilizado, con permeabilidades	Xu et al. (2023)

entre capas de óxido de grafeno		espacio entre capas de GO entre 2 - 4 nm	de menor viscosidad. Selectividad de CO_2/CH_4 de 132 % en membranas óptimas, con selectividad mejorada en menor espaciamiento de capas Mayor eficiencia en separación con Pebax - MOF. Selectividad CO_2/N_2 de 55.2 %	superiores.	
Polímero Pebax con MOFs <i>CeZr</i>	Electrospinning	45 °C y 3 bar		460 GPU	Du et al. (2023)
Polialcohol de vinilo y nanopartículas poliméricas	Separación bajo diferentes niveles de humedad	Diferentes condiciones de presión	Eficiencia de 95 % y selectividad de 48.9 %	Permeabilidad de las membranas con microporos y mesoporos favoreciendo la permeabilidad	Pan et al. (2021)
Pebax con MOF	Interacciones metálicas	30 °C y 2 bar	Optimización del 55 % en transporte de CO_2 . Selectividad de CO_2/CH_4 de 41.2 %	140 GPU	Qin et al. (2023)
SPEEK con 20 % de Zeolita <i>NaY</i>	Transporte de gas a través de nano - canales en la matrix SPEEK	1 bar, gas puro, pruebas a humedad elevada	Mejora significativa con un 20 % de carga de <i>NaY</i> . Selectividad de CO_2/N_2 de 63 %	Alta permeabilidad debido a la zeolita <i>NaY</i> .	Wang et al. (2021)
Polisulfona con SNW - 3	Separación facilitada por adsorción	Presión de 23.8 atm a 31.8 atm	Incremento de 400 % en permeabilidad de CO_2 . Selectividad de 62.3 % Se logra una recuperación del 85 % y una pureza del 89 % de CO_2 .	600 GPU	Wang Zhao-Xu et al. (2023)
Nanotubos funcionalizados	Proceso híbrido de membrana - criogenico	sub - ambiente (temperatura reducida)	Selectividad óptima.	Alta permeabilidad	Tu ZH et al. (2021)

Polietileno oxido (PEO) fotopolimerizado	Separación por solubilidad y difusión	Presión de alimentación de 2.9 a 4.5 bar; presión de permeado de 0,25 bar	Se optimiza la recuperación y pureza entre el 50.95 %. Selectividad de 39.5 %	11.5 Barrer	Li et al. (2022)
Poliamida con polivinilamina	Transporte facilitado	30 °C y 1 bar	Rendimiento estable. Selectividad de 39.5 %	12 Barrer	Li et al., (2022)
Pebax con ZIF-8	Separación	25 °C y 1 bar	Incremento del 80.7 % en permeabilidad y 118 % en selectividad. Selectividad de 49 %	13 GPU	Jiao, Chengli et al. (2021)
Pebax con MXene y CMC	Difusion molecular	298 K y 0,2 MPa	Estabilidad de 60 horas sin degradación. Selectividad de 40 %	521 GPU	Luo et al. (2022)
Poliamida con ZnO MOF	Separación por solución - difusión	503 K y 1 bar	Aumento del 67 % en permeabilidad. Selectividad de 39.5 %	11,5 GPU	Li et al. (2022)
Polímero con nanopartículas metálicas	Transporte facilitado	42 °C y 6 bar	Optimización en captura de CO ₂ . Selectividad de 57.1 %	510 GPU	Xu Wenqi et al. (2023)

Apéndice D. Membranas líquidas.

MATERIALES	TÉCNICA UTILIZADA	CONDICIONES DE OPERACIÓN	RENDIMIENTO Y SELECTIVIDAD	PERMEABILIDAD	FUENTE
MOF <i>UIO</i> – 66 – (OH) ₂ funcionalizado con oligomero SIT y PEAs	Adsorción selectiva	Temperatura y presión ambiente	Rendimiento estable durante meses. Selectividad alta para CO ₂ /N ₂	Alta capacidad de adsorción de CO ₂ , mejorando hasta un 117 %	Cheng et al. (2024)
PTFE con MOFs <i>Cu/Mg</i> y líquidos iónicos	Separación por líquidos iónicos	Presión de 0,5 a 2 bar, humedad de 30 a 50 %	Mayor permeabilidad con humedad alta, pero menos selectividad. Selectividad de 33.26 %	2937 Barrer (Seco) y 4628 Barrer (humedad 50 %)	Ali et al. (2023)
Líquidos porosos basados en jaulas orgánicas	Adsorción selectiva con efecto de nanoconfinamiento	Variable según solventes	Control de difusión de CO ₂ en nanoestructuras. Selectividad depende del solvente	Alta estabilidad mecánica	Li & Yuan. (2024)
Poliamida con líquidos iónicos	Transporte facilitado	30 °C y 1 bar, condiciones secas	Absorción eficiente de CO ₂ . Selectividad CO ₂ /CH ₄ de 267,3 % y CO ₂ /N ₂ de 133.6 %	13.9 Barrer	Wrya Aframe Hr et al. (2022)
Líquido iónico soportada SILM	Separación facilitada	40 °C y 0.1 bar	Rendimiento alto y selectividad de 78 %	2572 Barrer	Tu et al. (2021)
Soportes de líquidos iónicos	Transporte facilitado con líquidos iónicos	30 °C y 12 MPa	Transporte facilitado optimizado y selectividad de 27.1 %	22.6 GPU	Sun et al. (2021)
Líquidos iónicos sobre un soporte de PVDF poroso	Adsorción selectiva	Temperatura ambiente y 0.6 MPa	Rendimiento de 35.4 % y selectividad de 56.2 %	Alta absorción	Pan et al. (2021)
Líquidos iónicos con diferentes	Transporte facilitado	35 °C y 2 bar	Rendimiento alto y selectividad de	2000 Barrer	Li et al. (2023)

grupos funcionales			53.2 %		
Polímeros con líquidos iónicos confinados	Transporte facilitado	25 °C y 2 bar	Captura de CO ₂ en gas natural y emisiones industriales. Selectividad de 32.94 %	281 Barrer	Zheng et al. (2022)

Apéndice E. Comparación de membranas

TIPO DE MEMBRANA	FLUJO (L/m².h)	TEMP. OP. (°C)	P. OP (BAR)	SELECT. (RECHAZO %)	COSTO (USD/m²)	VIDA ÚTIL APROX. (AÑOS)	PERME. (BARRER)
Polimérica	50 - 300	0 - 100	2 - 40	85 - 99	10 - 100	2 - 5	100 - 5000
Inorgánica (cerámica)	200 - 1000	Hasta 800	Hasta 100	90 - 99.9	200 - 1000	5 - 20	1 - 100
Híbrida (polímero-cerámica)	100 - 500	0 - 200	Hasta 50	90 - 99	100 - 500	3 - 10	200 - 3000
Líquida soportada	5 - 50	0 - 80	< 10	Hasta 99.9	50 - 300	1- 2	50 - 500
Iónica (intercambio iónico)	20 - 200	0 - 90	Hasta 5	85 - 98	50 - 200	2 - 7	100 - 1500