

## Revisión de las principales tecnologías de captura de CO<sub>2</sub> para los efluentes de sistemas de producción de energía

Daniel Enrique Hernández-Hernández, Esveidi Montserrat Valdovinos-García y Moisés Abraham Petriz-Prieto \*

División Académica Multidisciplinaria de Jalpa de Méndez, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Jalpa de Méndez, Tabasco, México.

\* Autor de correspondencia: [moises\\_petriz@ujat.mx](mailto:moises_petriz@ujat.mx)

### Artículo de divulgación científica

Recibido: 8 de junio de 2025 Aceptado: 12 de julio de 2025 Publicado: 23 de julio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.485>

**Resumen:** El desarrollo industrial ha incrementado significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero, provocando un aumento acelerado en la temperatura global y agravando el problema del calentamiento global. Para enfrentar esta crisis, es fundamental implementar estrategias efectivas, sostenibles y económicamente viables. Entre los gases responsables, el CO<sub>2</sub> es el más relevante, lo que ha impulsado una intensa investigación en técnicas de captura para mitigar su impacto ambiental. Este artículo presenta una revisión bibliográfica enfocada en analizar las principales ventajas y desafíos de tres tecnologías de captura de CO<sub>2</sub>: separación por membranas, absorción y adsorción. Los hallazgos indican que la absorción y la adsorción han sido ampliamente investigadas, con avances significativos en los últimos años. En particular, la absorción ha centrado sus esfuerzos en el desarrollo de nuevos materiales, como aminas y líquidos iónicos, con el objetivo de mejorar la eficiencia de captura y reducir el consumo energético. Por otro lado, la adsorción ha incorporado procesos como la radiación por microondas para optimizar su desempeño. Asimismo, la revisión reveló que las tecnologías de membrana y adsorción aún se encuentran en etapas piloto y de demostración, mientras que la absorción ya ha alcanzado una fase comercial, lo que explica su mayor implementación y uso.

**Palabras clave:** captura de CO<sub>2</sub>; membranas; adsorción; absorción; cambio climático.

### Introducción

En la actualidad, el cambio climático es consecuencia del incremento en la concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el principal gas de efecto invernadero, Figura 1(a) y 1(b). Aunque este compuesto desempeña un papel clave en el equilibrio térmico del planeta y en la preservación de la biodiversidad, su aumento descontrolado ha intensificado los efectos del calentamiento global (Yan *et al.*, 2017). El incremento significativo de CO<sub>2</sub> en la atmósfera desencadena diversos problemas, como la elevación del nivel del mar, el deshielo de los glaciares y la acidificación de los océanos. Estos cambios impactan a todos los seres vivos, incluidos los seres humanos (Fu *et al.*, 2022).

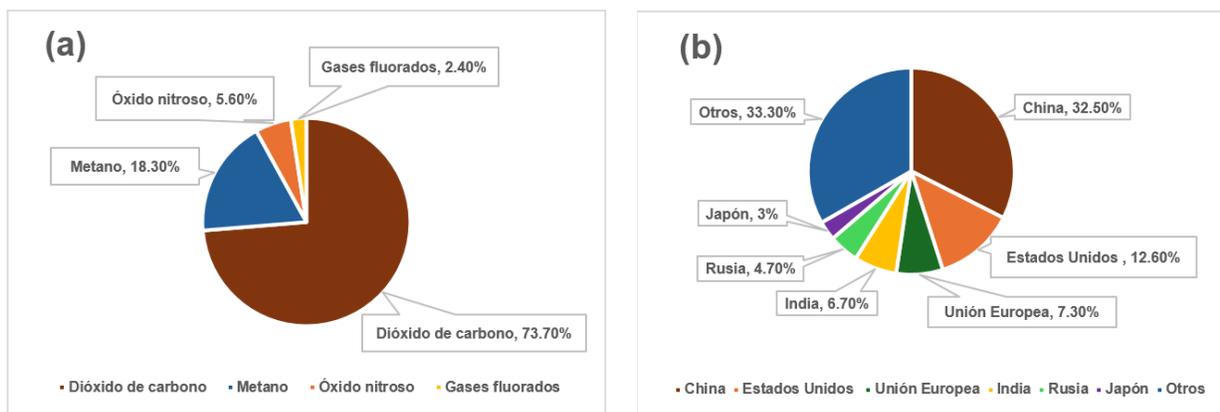


Figura 1. (a) Emisiones globales de gases de efecto invernadero en 2018 por gas (Dziejarski *et al.*, 2023) y (b) Emisiones globales de CO<sub>2</sub> provenientes de la quema de combustibles fósiles en 2020 por país (Dziejarski *et al.*, 2023).

Los gases de efecto invernadero se emiten principalmente a gran escala desde fuentes fijas con altas concentraciones de CO<sub>2</sub>, como las plantas de generación eléctrica y diversos procesos industriales. Estas emisiones provienen de la combustión de combustibles fósiles como el gas natural, el petróleo y el carbón (Lillia *et al.*, 2018). Hasta la Revolución Industrial, los niveles de CO<sub>2</sub> se mantenían estables en alrededor de 280 ppm; desde entonces, las actividades humanas

han generado aproximadamente 1.5 billones de toneladas de dióxido de carbono, y las emisiones totales han aumentado un 47 % en la última década, en 2022, los niveles alcanzaron 421 ppm (Cantador-Fernández *et al.*, 2023).

Como resultado, muchas fuentes importantes de emisiones han adoptado uno de los tres sistemas de captura de carbono disponibles: sistemas de captura de oxidación, precombustión y postcombustión. Estos sistemas están orientados hacia el rendimiento de la captura y los requisitos mínimos de energía (Yoro *et al.*, 2016).

El sistema de captura de oxidación utiliza un gas de combustión principalmente de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, que se crea mediante el uso de oxígeno puro en lugar de aire ambiente (Wohlthán *et al.*, 2024). En un sistema de precombustión, se produce un proceso de conversión en el que el CO<sub>2</sub> es el producto no deseado generado y capturado (Favre, 2007), tanto el monóxido de carbono como los gases de hidrógeno reaccionan con el oxígeno/aire, generando un exceso de CO<sub>2</sub>. Un sistema de captura de postcombustión tiene la capacidad de reducir la concentración de CO<sub>2</sub> entre un 5% y un 15% cuando se captura de la corriente de gases residuales después de la conversión de la fuente de carbono (Tontiwachwuthikul *et al.*, 2011).

Los tres sistemas son potencialmente útiles para mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> globales. No obstante, la captura de postcombustión es más ventajosa que los otros dos sistemas porque se puede adaptar a las plantas existentes, lo que reduce los costos de capital iniciales de esta fuente de mitigación (Madden & Curtin, 2016).

## Desarrollo

### Separación por membranas: adaptabilidad en sistemas de precombustión y postcombustión

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la relación entre la selectividad y la permeabilidad en los tres tipos de membrana (Esther Puentes Quiroz Laura Andrea Velandia Charris & Omar Andrés Benavides Prada, n.d.).

Membranas	Ventajas	Desventajas	Fuente
Poliméricas	Fácil síntesis y fabricación Bajo costo de producción Buena estabilidad mecánica	Baja estabilidad térmica y química Plastificación El tamaño de los poros no se puede ajustar Sigue el equilibrio entre selectividad y permeabilidad	(Kamolov <i>et al.</i> , 2023; Vinoba <i>et al.</i> , 2017)
Inorgánicas	Mayor estabilidad química, mecánica y térmica El tamaño de los poros es ajustable Capaz de trabajar en condiciones duras Compensación moderada entre selectividad y permeabilidad	Frágil Alto costo Dificultades a la hora de su aplicación	(Kamolov <i>et al.</i> , 2013)
De Matriz Mixta	Mejor estabilidad mecánica y térmica Menor plastificación Menor necesidad de energía Compactos a mayor presión Supera el equilibrio entre selectividad y permeabilidad	La elevada fracción de cargas lo hace frágil en la matriz polimérica La calidad de la matriz polimérica dicta la estabilidad química y térmica	(Joglekar <i>et al.</i> , 2019; Tang <i>et al.</i> , 2021)

Las técnicas de separación mediante membranas representan una alternativa moderna y eficiente para extraer CO<sub>2</sub> de mezclas gaseosas resultantes de procesos de combustión (Mondal *et al.*, 2012). Este método se basa en el uso de una delgada película de material semipermeable, capaz de permitir el paso selectivo de ciertos componentes del gas. La separación ocurre cuando se aplica una fuerza impulsora, como una diferencia de presión, temperatura o un gradiente

eléctrico entre ambos lados de la membrana. Como resultado, la corriente original de gas (también conocida como corriente de alimentación) se divide en dos flujos: uno que atraviesa la membrana, llamado permeado, y otro que queda retenido, conocido como retentado (Dziejarski *et al.*, 2023).

Las membranas empleadas en la separación de CO<sub>2</sub> pueden clasificarse atendiendo a tres aspectos fundamentales: su origen, su morfología y su estructura. El desempeño de una membrana está directamente relacionado con los materiales empleados en su fabricación, así como con su capacidad para permitir el paso del CO<sub>2</sub> y su nivel de selectividad. Estos dos factores, permeabilidad y selectividad son determinantes en la viabilidad económica de un proceso de separación de gases. En particular, la selectividad es clave, ya que permite alcanzar altos niveles de pureza y eficiencia en la recuperación del CO<sub>2</sub> (Jasim *et al.*, 2023).

Existen tres tipos principales de membranas: poliméricas, inorgánicas y de matriz mixta (MMM), cada una de ellas clasificada en membranas porosas y no porosas (Mahenthiran & Jawad, 2021). Las membranas orgánicas o poliméricas, elaboradas con polímeros como acetato de celulosa o poliamidas, permiten ajustar su desempeño mediante su composición y método de fabricación (Song *et al.*, 2023). Las inorgánicas, hechas de materiales como cerámicos, metales o zeolitas, destacan por su alta estabilidad térmica y química (Cheng *et al.*, 2023). Por último, las membranas de matriz mixta combinan un polímero con relleno inorgánico, aprovechando lo mejor de ambos materiales en términos de permeabilidad y selectividad (Niu *et al.*, 2024).

#### *Absorción: la solución tradicional en la captura postcombustión*

La captura de CO<sub>2</sub> mediante absorción se fundamenta en la transferencia del CO<sub>2</sub>, presente en una corriente gaseosa, hacia una fase líquida, utilizando una solución acuosa de carácter alcalino que actúa como absorbente selectivo. En los procesos industriales, esta operación se lleva a cabo en un sistema compuesto por dos torres principales. La primera, conocida como columna de absorción, opera a temperaturas entre 40 y 60 °C, y es donde el solvente químico atrapa el CO<sub>2</sub> del gas. La solución que resulta cargada de dióxido de carbono es enviada luego a una segunda torre, llamada columna de regeneración. En esta etapa, el solvente se somete a temperaturas elevadas, entre 100 y 140 °C, bajo una presión cercana a la atmosférica, lo que permite liberar el CO<sub>2</sub> absorbido. Una vez regenerado, el solvente puede ser reutilizado en el ciclo, ya con una concentración mínima de CO<sub>2</sub> (Buvik *et al.*, 2021).

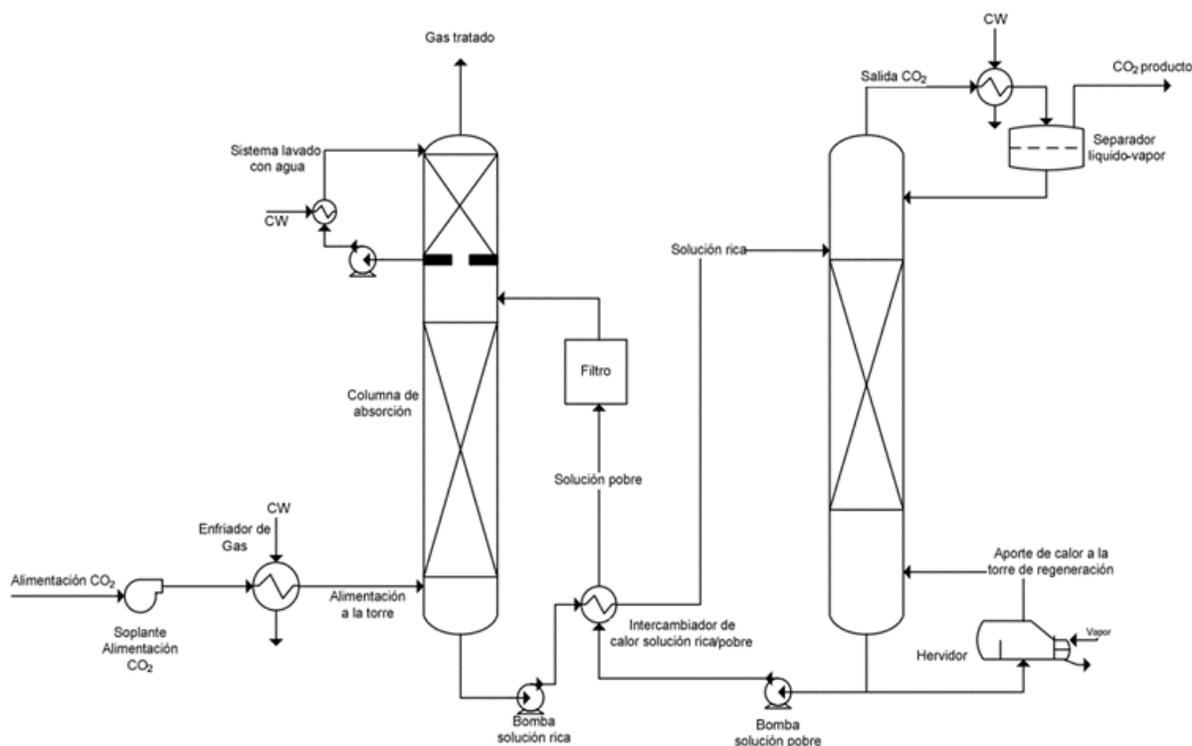


Figura 2. Diagrama básico comercial para un sistema de absorción de CO<sub>2</sub> (Luis & Fuentes, 2007).

La absorción del dióxido de carbono puede clasificarse según el tipo de interacción que se produce entre los componentes del gas y el líquido absorbente. En el caso de la absorción física, el CO<sub>2</sub> se disuelve preferentemente en el líquido sin que ocurra una reacción química, debido a su mayor solubilidad en comparación con otros gases presentes. Por otro lado, en la absorción química, sí se da una reacción entre el CO<sub>2</sub> y algún compuesto presente en la fase líquida. Un ejemplo representativo es el uso de aminas como solventes, donde el gas rico en dióxido de carbono entra en contacto con el líquido absorbente dentro de una columna empacada. Entre los solventes más utilizados se encuentran la monoetanolamina (MEA), la dietanolamina (DEA) y la metildietanolamina (MDEA), cada una con propiedades específicas que las hacen adecuadas para distintas condiciones de operación (Buvik *et al.*, 2021).

Durante muchos años, las aminas han sido empleadas en procesos de endulzamiento del gas natural. Sin embargo, su aplicación en la captura de CO<sub>2</sub> postcombustión presenta ciertos inconvenientes, como el elevado consumo energético y los problemas de corrosión, asociados principalmente al alto contenido de agua en el sistema y a las temperaturas necesarias para regenerar el solvente. A pesar de estas limitaciones, la absorción química sigue siendo una opción eficaz para remover CO<sub>2</sub>, especialmente cuando se trata de corrientes con baja concentración de este gas y operando a presiones moderadas o bajas (D. F. Chuahy *et al.*, 2023).

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los absorbentes en absorción (Esther Puentes Quiroz *et al.*, 2024)

Absorbente	Ventajas	Desventajas
MEA	Alta velocidad de reacción con CO <sub>2</sub> . Moderada capacidad de absorción. Bajo costo del disolvente.	Alto requisito energético. Consume hasta el 50% de energía del proceso. Impacto nocivo para el medio ambiente. Alto consumo operativo.
DEA	Bajo costo. Alta velocidad de reacción.	Alta energía para la regeneración del solvente debido a su alto calor de absorción.
MDEA	Bajo costo. Propiedades mejoradas contra la degradación y la corrosión.	Tasas de absorción más bajas.

#### Adsorción en la postcombustión: precisión en la separación y alternativa en evolución

La adsorción es un método muy utilizado para separar y concentrar el dióxido de carbono presente en mezclas gaseosas, como los gases de combustión o el aire ambiente. Las partículas tienen la capacidad de unirse a adsorbentes específicos como zeolitas, carbonos porosos (carbón activado, tamices moleculares de carbono), óxidos metálicos, silicatos porosos y estructuras organometálicas (Mukherjee *et al.*, 2019).

El proceso de adsorción es cíclico y consta de dos procesos separados: la adsorción y la desorción de CO<sub>2</sub>. Tiene lugar como resultado de la capacidad de sorción desigual del adsorbente y la velocidad de la cinética de adsorción de agentes gaseosos seleccionados de la mezcla separada. Durante la adsorción, se llena un aparato experimental con el adsorbente. Después de eso, el gas de combustión que contiene CO<sub>2</sub> se transporta a través de él. Además, la mezcla de gases se conduce a la superficie del material absorbente sólido, que adsorbe moléculas de CO<sub>2</sub> y pasa otros gases a través de su estructura. Después de la adsorción, el CO<sub>2</sub> se elimina de la capa adsorbente (proceso de desorción): la regeneración del adsorbente para su reutilización y luego el CO<sub>2</sub> desorbido se transporta, acondiciona y comprime (Younas *et al.*, 2016).

La tecnología basada en adsorción, que generalmente utiliza adsorbentes en lechos empacados, puede agruparse en tres modos operativos principales, según cómo se lleva a cabo la regeneración del adsorbente: adsorción por oscilación de presión (PSA), adsorción por oscilación de vacío (VSA) y adsorción por cambio de temperatura (TSA).

En el proceso de adsorción, se dispone de una amplia gama de sorbentes, tanto comercialmente disponibles como en desarrollo. Estos incluyen carbones activados, zeolitas, estructuras organometálicas (MOF) y estructuras orgánicas covalentes (COF). Este amplio espectro demuestra que la elección del adsorbente es esencial para llevar a cabo un proceso eficiente, considerando aspectos como alta capacidad de regeneración, alta selectividad, baja penalización de energía para la captura de CO<sub>2</sub>, capacidad cíclica estable, estabilidad a largo plazo y sobre todo un bajo costo.

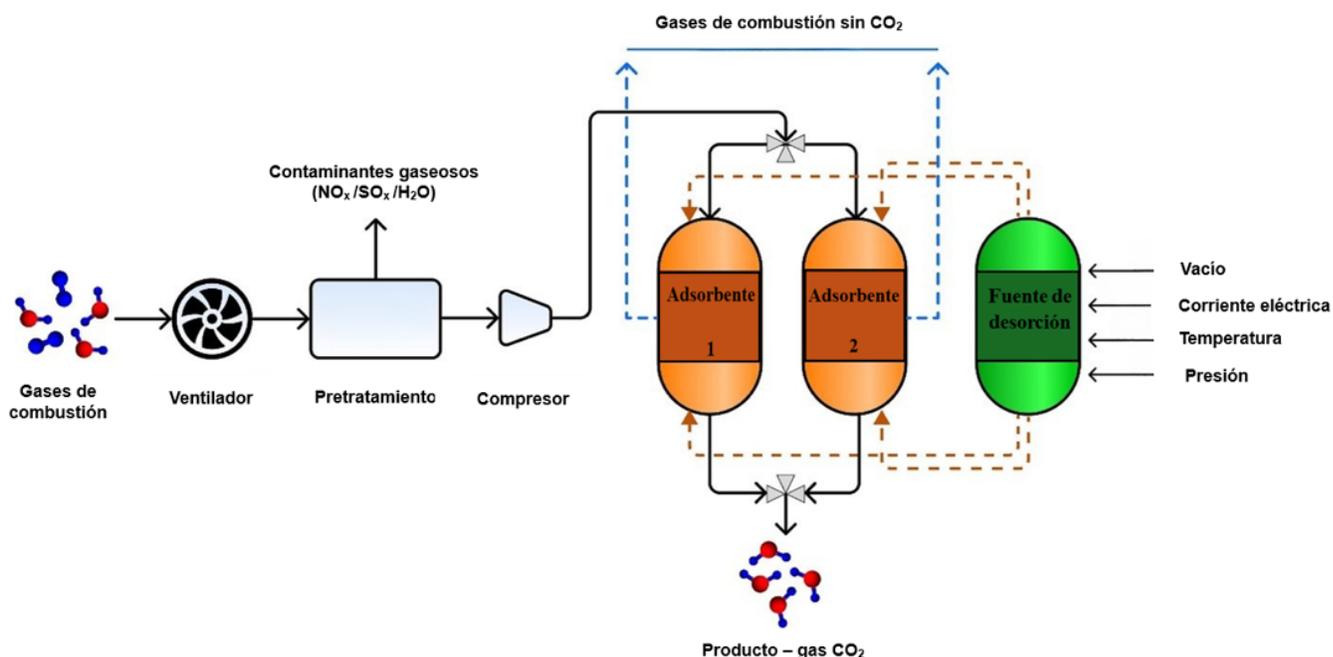


Figura 3. Diagrama esquemático del proceso de adsorción de CO<sub>2</sub> (Dziejarski *et al.*, 2023).

### Comparación de las tres tecnologías

La Tabla 3 resume una comparativa de las tres tecnologías de separación para la captura de CO<sub>2</sub>.

Tabla 3. Ventajas y desventajas para las tecnologías de separación para la captura de CO<sub>2</sub> (Esther Puentes Quiroz *et al.*, 2024).

Proceso	Ventajas	Desventajas
Absorción	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tecnología más madura.</li> <li>Altas eficiencias de absorción (&gt;90%).</li> <li>El disolvente se regenera por encima de 95%.</li> <li>Los absorbentes se pueden regenerar mediante despresurización y calentamiento.</li> <li>La alta reactividad.</li> <li>Bajo costo del solvente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Degradación del disolvente.</li> <li>LA regeneración requiere una gran cantidad de energía.</li> <li>Entorno corrosivo.</li> <li>Emisiones por degradación del disolvente.</li> <li>Costo de mantenimiento relativamente alto.</li> <li>La eficiencia de la absorción depende en gran medida de las concentraciones de CO<sub>2</sub>.</li> </ul>
Adsorción	<ul style="list-style-type: none"> <li>Proceso reversible y absorbentes reciclables.</li> <li>Altas eficiencias de adsorción (&gt;85%).</li> <li>Baja generación de residuos.</li> <li>Resistente al uso a largo plazo.</li> <li>Menor impacto ambiental.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se necesitan adsorbentes de alta temperatura.</li> <li>Requiere alta energía para la desorción de CO<sub>2</sub>.</li> <li>El proceso de desorción consume mucha energía.</li> </ul>
Membrana	<ul style="list-style-type: none"> <li>Altas eficiencias de separación (&gt;80%).</li> <li>Sin procesos de regeneración.</li> <li>Se producen menos residuos sólidos.</li> <li>Menos consumo de químicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Equilibrio de permeabilidad y selectividad.</li> <li>Altos costos de funcionamiento.</li> <li>Alta energía para los compresores.</li> </ul>

## Revisión de avances recientes en tecnologías de captura de CO<sub>2</sub>

Las membranas utilizadas para la captura de CO<sub>2</sub> han mostrado avances notables en los últimos años gracias al desarrollo de membranas híbridas, conocidas como de matriz mixta (MMM). Estas combinan materiales poliméricos con rellenos inorgánicos, logrando superar la tradicional limitación entre permeabilidad y selectividad. En un estudio reciente, Li, Kujawa, *et al.* (2024) reportaron que las MMM con nanorrellenos bidimensionales alcanzaron una selectividad CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> superior al 50 % junto con una alta estabilidad mecánica, demostrando su potencial para aplicaciones industriales (Li, Kujawa, *et al.*, 2024).

La absorción química continúa siendo ampliamente utilizada, especialmente con solventes basados en aminas. Sin embargo, investigaciones recientes han buscado aumentar su eficiencia y reducir su elevado consumo energético mediante nuevas formulaciones. Por ejemplo, Li, Shen, *et al.* (2024) evaluaron una mezcla ternaria de aminas (DEEA+PZ+PD) y encontraron una capacidad de carga de CO<sub>2</sub> de 0.988 mol CO<sub>2</sub>/mol amina, con un consumo energético de regeneración de 2.14 GJ/t CO<sub>2</sub>, lo que supone una mejora del 43.7 % respecto a la monoetanolamina tradicional (Li, Shen, *et al.*, 2024).

En el caso de la adsorción, la investigación se ha centrado en el uso de materiales sólidos como zeolitas y tamices moleculares de carbono. Estos adsorbentes han demostrado alta selectividad y buena capacidad de captura, aunque con retos asociados a la regeneración. Un estudio comparativo realizado por Gutierrez-Ortega *et al.* (2022) mostró que las zeolitas sin aglutinante ofrecieron mayor selectividad CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> y menor consumo energético en regeneración frente a los tamices moleculares de carbono, confirmando su potencial en procesos de postcombustión (Gutierrez-Ortega *et al.*, 2022).

## Conclusiones

La presente revisión ha abordado de manera integral tres de las tecnologías más relevantes para la captura de dióxido de carbono: separación por membranas, absorción y adsorción. Cada una de ellas representa una estrategia con potencial comprobado para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a mitigar el impacto del cambio climático.

La separación por membranas se perfila como una opción atractiva gracias a su bajo requerimiento energético, ya que aprovecha gradientes de presión y concentración, y puede operar a temperaturas moderadas, lo que reduce los costos operativos en comparación con otros métodos. No obstante, su implementación a gran escala aún enfrenta retos importantes, particularmente en el equilibrio entre permeabilidad y selectividad, lo que mantiene a esta tecnología en fases piloto y de demostración.

Por su parte, la absorción química ha sido ampliamente usada en la industria mediante aminas como la MEA, demostrando ser una técnica eficiente para eliminar CO<sub>2</sub>. Sin embargo, presenta limitaciones como el elevado consumo energético durante la regeneración del solvente y problemas asociados a la corrosión. Frente a estas dificultades, la investigación actual ha orientado sus esfuerzos hacia el desarrollo de adsorbentes alternativos como mezclas de aminas, nanofluidos y líquidos iónicos, en busca de procesos más sostenibles y económicos.

Finalmente, la adsorción ha mostrado resultados prometedores en cuanto a eficiencia de captura, empleando materiales como carbón activado, zeolitas y estructuras tipo MOF. A pesar de ello, su aplicación industrial enfrenta desafíos relacionados con los altos costos de regeneración y reposición de los adsorbentes. No obstante, la combinación de esta técnica con otros métodos de separación, así como el desarrollo de nuevos materiales, abre un panorama alentador para el futuro.

Estos avances evidencian que la captura de CO<sub>2</sub> no es un camino único, sino un abanico de soluciones en constante evolución. Para que estas tecnologías logren una implementación amplia y efectiva, es indispensable continuar invirtiendo en investigación, desarrollo de nuevos materiales y mejoras en la eficiencia de los procesos. Solo así será posible convertir estas estrategias en herramientas económicamente viables y ambientalmente sostenibles, capaces de integrarse de manera realista en la lucha global contra el cambio climático.

## Bibliografía

- Buvik, V., Bernhardsen, I. M., Figueiredo, R. V., Vevelstad, S. J., Goetheer, E., van Os, P., & Knuutila, H. K. (2021). Measurement and prediction of oxygen solubility in post-combustion CO<sub>2</sub> capture solvents. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 104, 103205. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103205>
- Cantador-Fernández, D., Suescum-Morales, D., Esquivel, D., Jiménez, J. R., & Fernández-Rodríguez, J. M. (2023). CO<sub>2</sub> adsorption by ethane periodic mesoporous organosilica at low temperatures and high pressure. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110582. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110582>
- Cheng, X., Liao, Y., Lei, Z., Li, J., Fan, X., & Xiao, X. (2023). Multi-scale design of MOF-based membrane separation for CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> mixture via integration of molecular simulation, machine learning and process modeling and simulation. *Journal of Membrane Science*, 672, 121430. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121430>
- D. F. Chuahy, F., Kincaid, K., & Nawaz, K. (2023). A thin-film modeling approach for analysis of carbon capture sorbent-based devices. *Carbon Capture Science & Technology*, 9, 100134. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100134>
- Dziejarski, B., Krzyżyńska, R., & Andersson, K. (2023). Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment. *Fuel*, 342, 127776. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127776>
- Esther Puentes Quiroz Laura Andrea Velandia Charris, L., & Omar Andrés Benavides Prada, C. (2024). *TECNOLOGÍAS PARA CAPTURA DE CO<sub>2</sub> 1 Revisión Sistemática de Tecnologías para Captura de CO<sub>2</sub>*.
- Favre, E. (2007). Carbon dioxide recovery from post-combustion processes: Can gas permeation membranes compete with absorption? *Journal of Membrane Science*, 294(1–2), 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.02.007>
- Gutierrez-Ortega, A., Montes-Morán, M. A., Parra, J. B., Sempere, J., Nomen, R., & Gonzalez-Olmos, R. (2022). Comparative study of binderless zeolites and carbon molecular sieves as adsorbents for CO<sub>2</sub> capture processes. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 61, 102012. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102012>
- Fu, L., Ren, Z., Si, W., Ma, Q., Huang, W., Liao, K., Huang, Z., Wang, Y., Li, J., & Xu, P. (2022). Research progress on CO<sub>2</sub> capture and utilization technology. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 66, 102260. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102260>
- Jasim, D. J., Mohammed, T. J., Harharah, H. N., Harharah, R. H., Amari, A., & Abid, M. F. (2023). Modeling and Optimal Operating Conditions of Hollow Fiber Membrane for CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> Separation. *Membranes*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/membranes13060557>
- Lillia, S., Bonalumi, D., Grande, C., & Manzolini, G. (2018). A comprehensive modeling of the hybrid temperature electric swing adsorption process for CO<sub>2</sub> capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 74, 155–173. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.04.012>
- Luis, A., & Fuentes, L. (2007). Captura de CO<sub>2</sub> en postcombustión: absorción.
- Li, G., Kujawa, J., Knozowska, K., Kareiva, A., Favre, E., Castel, C., & Kujawski, W. (2024). The advancements in mixed matrix membranes containing functionalized MOFs and 2D materials for CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> separation and CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> separation. *Carbon Capture Science & Technology*, 13, 100267. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100267>
- Li, G., Shen, X., Jiao, X., Xie, F., Hua, J., Lin, H., Yan, F., Wu, H., & Zhang, Z. (2024). Novel tri-solvent amines absorption for flue gas CO<sub>2</sub> capture: Efficient absorption and regeneration with low energy consumption. *Chemical Engineering Journal*, 493, 152699. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2024.152699>
- Madden, D., & Curtin, T. (2016). Carbon dioxide capture with amino-functionalised zeolite-β: A temperature programmed desorption study under dry and humid conditions. *Microporous and Mesoporous Materials*, 228, 310–317. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.03.041>
- Mahenthiran, A. V., & Jawad, Z. A. (2021). A prospective concept on the fabrication of blend pes/peg/dmf/nmp mixed matrix membranes with functionalised carbon nanotubes for co<sub>2</sub>/n<sub>2</sub> separation. In *Membranes* (Vol. 11, Issue 7). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/membranes11070519>
- Mondal, M. K., Balsora, H. K., & Varshney, P. (2012). Progress and trends in CO<sub>2</sub> capture/separation technologies: A review. *Energy*, 46(1), 431–441. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.08.006>
- Mukherjee, A., Okolie, J. A., Abdelrasoul, A., Niu, C., & Dalai, A. K. (2019). Review of post-combustion carbon dioxide capture technologies using activated carbon. *Journal of Environmental Sciences*, 83, 46–63. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.03.014>
- Niu, Z., He, N., Yao, Y., Ma, A., Zhang, E., Cheng, L., Li, Y., & Lu, X. (2024). Mixed matrix membranes for gas separations: A review. *Chemical Engineering Journal*, 494, 152912. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2024.152912>
- Song, X., Yao, X., Zhang, F., Ang, E. H., Rong, S., Zhao, K., He, K., & Xiang, H. (2023). Nanofiber membrane coated with lithiophilic polydopamine for lithium metal batteries. *Journal of Membrane Science*, 685, 121951. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121951>
- Tontiwachwuthikul, P., Idem, R., Gelowitz, D., Liang, Z. H., Supap, T., Chan, C. W., Sanpasertparnich, T., Saiwan, C., & Smithson, H. (2011). Recent progress and new development of post-combustion carbon-capture technology using reactive solvents. In *Carbon Management* (Vol. 2, Issue 3, pp. 261–263). <https://doi.org/10.4155/cmt.11.20>
- Wohlthian, M., Thaler, B., Helf, A., Keller, F., Kaub, V., Span, R., Gräbner, M., & Pirker, G. (2024). Oxyfuel combustion based carbon capture onboard ships. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 137, 104234. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2024.104234>
- Yan, M., Li, Y., Chen, G., Zhang, L., Mao, Y., & Ma, C. (2017). A novel flue gas pre-treatment system of post-combustion CO<sub>2</sub> capture in coal-fired power plant. *Chemical Engineering Research and Design*, 128, 331–341. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.10.005>
- Yoro, K. O., Sekoai, P. T., Levy, J. K., & Yu, P. (2016). The Potential of CO<sub>2</sub> Capture and Storage Technology in South Africa's Coal-Fired Thermal Power Plants. *Environments 2016*, Vol. 3, Page 24, 3(3), 24. <https://doi.org/10.3390/ENVIRONMENTS3030024>
- Younas, M., Sohail, M., Leong, L. K., Bashir, M. J., & Sumathi, S. (2016). Feasibility of CO<sub>2</sub> adsorption by solid adsorbents: a review on low-temperature systems. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(7), 1839–1860. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1008-1>