

Tecnologías de captura de CO₂ en procesos de postcombustión de gas natural

Elizabeth Ayala Blanco^{*1}, Fernando Martínez Ortega²

1. Grupo de Investigación en Fluidos y Energía (GIFE). Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas. Parque Tecnológico UIS Guatiguará. Km 2 vía El Refugio. Piedecuesta, Santander, Colombia.
2. Centro de Investigación en Catálisis (CICAT). Escuela de Química, Universidad Industrial de Santander. Ciudad Universitaria, Cra 27 Calle 9, Bucaramanga, Santander, Colombia
*eayala@cdtdegas.com

RESUMEN

El desarrollo de tecnologías de captura de CO₂ en procesos de postcombustión ha sido impulsado por organismos nacionales e internacionales como una estrategia para la mitigación del cambio climático como desarrollo económico. La captura se perfila como una de las pocas tecnologías que permitirá a las industrias como la del acero, el hierro, el cemento, procesamiento de gas natural y refinerías, cumplir con los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Aquí se presenta una visión global y divulgativa del estado del arte de las diferentes tecnologías para los procesos de captura de CO₂, recopilando los diferentes materiales utilizados a nivel industrial y aquellos que se encuentran en proceso de desarrollo. Además, se presentan algunas alternativas tecnológicas que pueden mejorar la capacidad de remoción de este contaminante, las cuales aún se encuentran en fase experimental pero tienen gran potencial como estrategia para minimizar el impacto de requerimientos térmicos y económicos.

Palabras clave: Adsorción, Captura, Dióxido de Carbono, Postcombustión.

ABSTRACT

The development of CO₂ capture technologies in post-combustion processes has been promoted by national and international organizations as a strategy for mitigating climate change as economic development. CO₂ capture is emerging as one of the few technologies used in metallurgical, processing, natural gas processing industries, and refineries, to meet the goals of greenhouse gas emissions reduction.

This work, shows a global and informative view of the state of the art of different technologies available for CO₂ capture processes, and compiles the different materials used at the industrial level and those under developments. In addition, some technological alternatives are presented to improve the removal capacity of this pollutant, which are still in the experimental phase, but already show great projected potential as strategies to minimize the impact of thermal and economic requirements.

Keywords: Adsorption, Capture, Carbon Dioxide, Post-combustion.



1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático a nivel mundial como consecuencia de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en especial de CO₂, ha generado un gran interés en la investigación de tecnologías más eficientes para su captura. Actualmente existe una capacidad técnica de remoción de CO₂ de fuentes puntuales de emisiones como fábricas, refinerías, centrales eléctricas, entre otras; pero son muy pocos los desarrollos tecnológicos de gran escala, debido a los costos asociados.

El desarrollo económico de los países industrializados y subdesarrollados dependen de la demanda energética, y de acuerdo con la Agencia de Información de la Energía de Estados Unidos (Energy Information Administration - EIA) [1], se proyecta un aumento en el consumo mundial de energía del 28 % para el 2040, donde los combustibles fósiles como el petróleo, el gas natural (GN) y el carbón son las principales fuentes de consumo. En consecuencia, los gobiernos e industrias están promoviendo la captura y secuestro de carbono (CCS), como un instrumento

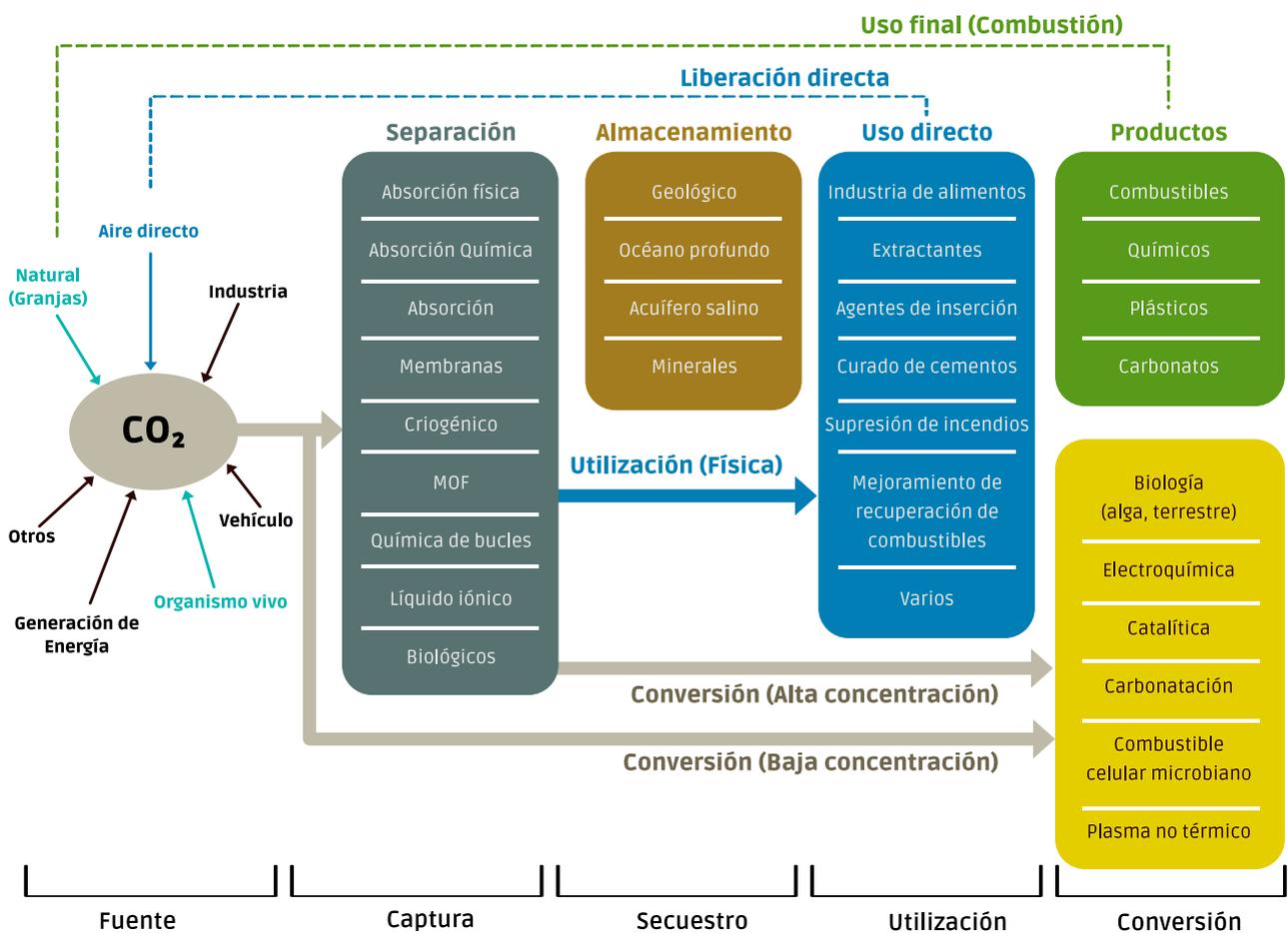


Figura 1. >> Conceptos de captura en postcombustión, utilización y tecnologías de almacenamiento de carbono. Adaptado [6].

de mitigación al cambio climático. Sin embargo, el CCS presenta limitaciones críticas tales como: el incremento elevado del costo de las operaciones, la reducción de la eficiencia de las centrales térmicas y gastos adicionales a largo plazo, entre otras [2, 3].

En los procesos de postcombustión se reduce la mayor cantidad de CO_2 por su eficiencia y mayor maduración tecnológica, algunos de los procesos que se contemplan son de absorción, adsorción, separación por membranas, separación criogénica y química de bucles [4], la cual es una tecnología nueva y presenta un alto potencial en combustión, gasificación y reforma de biomasa. A continuación se presenta una revisión global y divulgativa de algunas de las tecnologías que actualmente están siendo objeto de estudio y desarrollo para la CCS [5].

2. TECNOLOGÍAS DE CAPTURA DE CO_2 EN PROCESOS DE POSTCOMBUSTIÓN

Los sistemas de captura en procesos de postcombustión se basan fundamentalmente en ciclos de absorción/ desorción química, sin embargo para su aplicación a gran escala aún es necesario superar algunos problemas. Los mayores problemas que se pueden generar en estas tecnologías son la degradación, problemas de corrosión asociados al uso de solventes ricos en CO_2 , alto gasto energético para recuperación de solventes, entre otros.

Por lo tanto, las diferentes tecnologías de captura en procesos de postcombustión (ver Figura 1) pueden abarcar desde la absorción (física o química), adsorción, separación (criogénica o membrana) y combustión química de bucles.

2.1. ABSORCIÓN

Esta tecnología ya ha sido comercializada, basándose en la reversibilidad de las reacciones de neutralización ácido-base de los solventes acuosos alcalinos, comúnmente utilizados, con un gas ácido como el CO_2 . La absorción usada en los procesos de purificación de los gases se puede clasificar según la interacción que exista entre los gases y el absorbente: absorción física y absorción química; esta última puede ser reversible o irreversible y presenta mayor capacidad de absorción a presiones parciales de CO_2 bajas [7].

2.1.1. ABSORCIÓN FÍSICA

Este proceso depende únicamente de la solubilidad del gas y su presión parcial. Se emplea generalmente en procesos con altas presiones y tiene la ventaja de eliminar trazas de otros contaminantes, como hidrocarburos de alto peso molecular y compuestos orgánicos sulfurados, sin la formación de productos de reacción no deseados. En la Tabla 1 se indican los principales solventes utilizados en los procesos comerciales de absorción física. Durante la regeneración del solvente se reduce la presión aplicada al solvente que contiene el CO_2 en una o más etapas. Algunos ejemplos son la absorción de amoníaco en agua o la deshidratación del GN por absorción de vapor de agua en disoluciones de glicol [7].

En las plantas eléctricas de gasificación integrada en ciclo combinado, se usa un proceso de absorción física, dado que el gas de síntesis que sale del convertidor catalítico contiene CO_2 con una alta presión parcial. En el caso del Selexol (dimetiléter de polietilenglicol) se ha utilizado desde 1969 para la remoción de CO_2 y H_2S del gas natural en un rango entre 0°C a 5°C , mien-

Tabla 1. >> *Proceso de absorción física [7].*

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

tras que el Rectisol (metanol frío), es usado comúnmente para tratamiento de gas de síntesis generado durante los procesos de producción de hidrogeno en un intervalo de -35 °C a 60° C, separando selectivamente el CO₂ de mezclas que contengan en mayor proporción CO₂, H₂ y CO [8]. Sin embargo, debido a la complejidad de operación, su utilización no ha sido extendido a otras aplicaciones industriales.

2.1.2. ABSORCIÓN QUÍMICA

La absorción química con aminas y el ciclo de calcinación-carbonatación, son los procesos tecnológicos con mayor desarrollo y viabilidad. En este proceso el soluto reacciona con un componente presente en el solvente, y la relación entre la masa del gas disuelto y la presión parcial del soluto, el cual está determinado por su equilibrio químico. Los absorbentes más empleados son las alcanolaminas en solución acuosa, dado que la alcalinidad del grupo amino reacciona rápidamente con el CO₂ exotérmicamente.

Para poder utilizar esta técnica es necesario

verificar si el sistema es compatible para corrientes de gases con bajas concentraciones de CO₂, donde el gas de interés reacciona con un líquido de absorción. Los compuestos químicos utilizados generalmente son aminas u otros absorbentes que se encuentran en etapa de investigación y presentan gran afinidad por compuestos ácidos. La mayoría de los costos de operación en la absorción química se deben a los altos consumos energéticos, que oscilan alrededor del 70% de la energía del proceso. El calor necesario para regenerar una solución absorbente está relacionado con la entalpía de la reacción, que depende de la carga de la solución a regenerar y su concentración durante el proceso cíclico. Si no se lleva a cabo la regeneración del absorbente esta tecnología es inviable, debido a que impide el proceso cíclico. Otros inconvenientes son: el uso de solventes químicos corrosivos, degradación, formación de subproductos y la pérdida del solvente debido a las bajas presiones de vapor. En este tipo de proceso se utilizan compuestos alcalinos que reaccionan químicamente con los gases ácidos selectivamente, y algunos de estos compuestos

presentan activadores que permiten promover la transferencia de masa en la absorción [9]. En la Tabla 2 se presentan algunos de los solventes químicos más utilizados a nivel industrial, para capturar CO_2 utilizando el proceso de absorción química.

En general, los procesos con aminas son muy utilizados debido a su gran capacidad de remoción, bajo costo, flexibilidad en el diseño y operación del proceso. En el caso de las alcanolaminas, presentan un grupo hidroxilo que reduce la presión de vapor e incrementa la solubilidad en el agua, y un grupo amino con la basicidad necesaria para la absorción del gas ácido en solución.

Lionel Dubois y colaboradores [10] evaluaron por separado los rendimientos de absorción y regeneración de diferentes tipos de alcanolaminas primarias, secundarias, terciarias y con impedimentos estéricos como disolventes, mediante pruebas de detección a pequeña escala en un sistema gas-líquido. En términos de re-

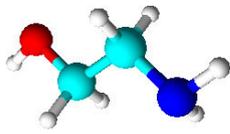
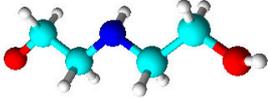
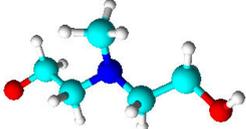
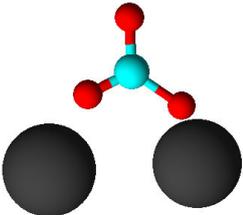
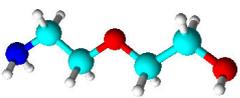
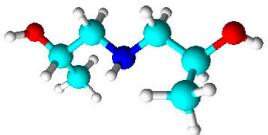
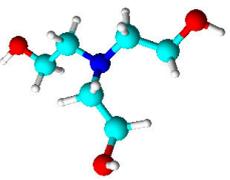
generación las aminas MDEA y AMP (30 % masa) presentan mayor viabilidad y menor costo energético en comparación con las aminas primarias (MEA) y secundarias (DEA), sin embargo, se presenta un efecto contrario en la capacidad de absorción.

Y para el caso de los procesos de calcinación-carbonatación, el sorbente que se utiliza es la caliza; en donde la carbonatación genera una reacción exotérmica entre los reactivos produciendo CaCO_3 y la calcinación genera un proceso inverso, que permite la desorción de CO_2 y CaO en presencia de calor [11].

2.2. ADSORCIÓN

La adsorción de gases es considerado un método prometedor para la captura de CO_2 en procesos de post-combustión. Este proceso logra la separación específica de una o varias especies, debido a la diferencia de afinidad entre las moléculas hacia la superficie de sólido. Se presentan dos tipos de adsorción: fisisorción, la cual se establecen interacciones débiles de

Tabla 2. >> Solventes químicos comerciales para procesos de absorción.

Aminas primarias	Aminas secundarias	Aminas terciarias	Otros
 Monoetanolamina (MEA)	 Dietanolamina (DEA)	 Metildietanolamina (MDEA)	 Carbonato de potasio K_2CO_3
 Diglicolamina (DGA)	 Diisopropanolamina (DIPA)	 Trietanolamina (TEA)	

tipo Van der Waals con la superficie, y la quimisorción con la formación de enlaces covalentes con la superficie. En el proceso de adsorción de CO_2 se establecen dos etapas: la adsorción, que determina la eficiencia de la captura, y desorción que requiere el mayor consumo de energía durante la regeneración del adsorbente, la cual determina la viabilidad económica del proceso [12, 13].

Se han investigado diferentes materiales adsorbentes tales como carbones activados, arcillas, zeolitas, entre otros. Kim y colaboradores [14] estudiaron la captura de CO_2 usando como adsorbente un sólido mesoporoso, denominado MCM-48 (SiO_2), el cual fue funcionalizado con aminas monoméricas y poliméricas con y sin impedimento estérico. En ese trabajo se evidenció que la concentración de grupos aminos unidos a la superficie favorecía significativamente la adsorción de CO_2 , permitiendo la regeneración del adsorbente, sin embargo el principal inconveniente es el incremento en el costo del proceso.

A pesar de que zeolitas o carbones activos son capaces de adsorber físicamente una cantidad importante de CO_2 a temperatura ambiente, presentan una disminución en su capacidad y selectividad de adsorción al incrementar la temperatura y por la presencia de agua y otros gases como N_2 y CH_4 . Shamik Chowdhury *et al.* [15] evaluaron una serie de nanocompuestos de TiO_2 mesoporosos con óxido de grafeno (GO), con diferentes relaciones de masa de GO y TiO_2 para captura de CO_2 . Al evaluar la capacidad de adsorción de CO_2 se logró capturar 1,88 mmol/g a temperatura ambiente. Este material TiO_2 /GO presentó una mayor eficiencia en comparación con otros adsorbentes comúnmente utilizados; además de presentar menor calor de adsorción

y selectividad de CO_2/N_2 , útil para captura de CO_2 en gases de combustión secos. Esto permite enfocar la exploración de otros materiales que permitan una mayor adsorción de CO_2 .

Otra alternativa para la captura de CO_2 ha sido la inmovilización covalente de aminas en la superficie de un óxido sólido, evitando problemas asociados con los procesos de absorción química, como son los altos costos de regeneración, corrosión de equipos y pérdidas de aminas por evaporación. Una de las aminas más utilizadas es la PEI (polietilendiamina) debido a la alta concentración por masa de adsorbente que se logra. Este tipo de adsorbentes no requieren que las corrientes de gases de combustión estén secas, ya que el agua aumenta la adsorción, mediante la formación de bicarbonatos. Los estudios realizados con sílices (SiO_2) de tipo SBA-15, que contienen la tetraetilpentamina (TEPA) y/o la dietilamina (DEA), permiten un aumento de alrededor de un 20 % en la eficiencia de la adsorción. Por lo tanto este tipo de adsorbentes presentan una viabilidad para la captura de CO_2 en corrientes gaseosas con baja presión, es decir corrientes de post-combustión, con capacidades de adsorción entre 0,089 y 0,22 g de CO_2 /g de adsorbente [17].

Otro de los materiales en proceso de investigación son nanoestructuras unidimensionales como los nanotubos, nanoláminas y nanobarras, dado que presentan interesantes propiedades ópticas, magnéticas y químicas como resultado de su tamaño nanométrico. Algunas de las propiedades más relevantes son la alta movilidad de los electrones, la alta superficie específica y los efectos de confinamiento cuántico. Por ejemplo, el dióxido de titanio es uno de los compuestos utilizados para crear nanoestructuras, usados en fotocatalisis, célu-

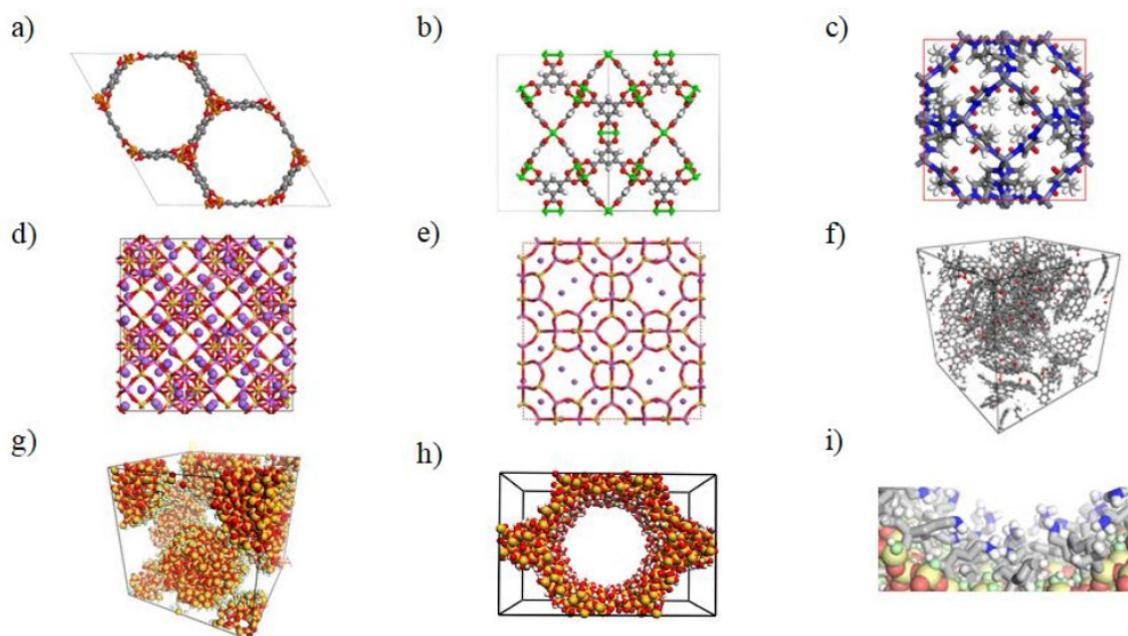


Figura 2. >> Algunos adsorbentes para captura de CO_2 . a) Mg-MOF-74, b) CuBTC, c) ZIF-8 d) Zeolita 13X, e) Zeolita LTA-4A, f) modelo carbón activado, g) modelo de sílice, h) MCM-41, i) Sílices funcionalizadas con compuestos aminosilanos [16].

las solares y dispositivos médicos, entre otros, debido a su alta estabilidad química, bajo costo, alta relación de área-volumen y alta actividad superficial [18].

Los nanotubos de óxido de titanio (TiNTs) son una opción viable para la captura de CO_2 , dado que estos compuestos presentan una gran área superficial, gran porosidad y reactividad superficial. Además, debido a la estabilidad hidrotérmica de su estructura tubular con poros grandes, ha permitido su funcionalización con aminas para favorecer la adsorción [18]. Algunas técnicas para la síntesis de los TiNTs con morfología nanotubular, han permitido obtener áreas específicas hasta $500 \text{ m}^2/\text{g}$. Dentro de esas técnicas se incluyen procesos de sol-gel, oxidación anódica, electrodeposición, deposición sonoquímica, tratamiento hidrotérmico y tratamientos químicos de partículas finas. Uno de los métodos químicos que presenta una

vía sencilla para la producción homogénea de TiNTs, es el método planteado por Kasuga, el cual permite obtener nanotubos de alta pureza, morfología controlada y capacidad de producción a gran escala, a través del tratamiento hidrotérmico de nanopolvo o nanopartículas de TiO_2 en una solución de NaOH, formando como fase cristalina la anatasa con alta área superficial [19], lo cual favorece la adsorción de CO_2 .

Algunos trabajos han estudiado la capacidad de captura de CO_2 en procesos de post-combustión de gas natural usando nanotubos de TiO_2 (TiNTs). En donde se han analizado el efecto de los parámetros de síntesis en las propiedades texturales (área superficial, volumen de poro y diámetro de poro) y su capacidad de adsorción de CO_2 . Se evidenció que la capacidad de adsorción de CO_2 es altamente influenciada por el aumento en el área superficial de TiNTs [20].

Fujiao Song y colaboradores [21] funcionalizaron con las aminas EDA, PEI y TEPA la superficie de nanotubos de TiO_2 (TiNTs) y observaron que la amina TEPA presentó la mayor capacidad de captura usando corrientes de gas natural. Además, se observó que la capacidad de captura crecía con el incremento de la temperatura (30, 50 y 70 °C). Al evaluar la regeneración del adsorbente, solo se presentó una disminución de la adsorción del 5 % después de 10 ciclos de reuso.

2.3. MEMBRANAS

El uso de membranas para la separación de componentes se basa en la diferencia de difusión de los gases en los poros. La velocidad de difusión o permeación depende principalmente de la presión diferencial entre ambos lados de la membrana, de su espesor, del tamaño y la solubilidad de las moléculas que lo atraviesan. En este proceso, la diferencia de presión parcial se utiliza como fuerza impulsora y generalmente se favorece la separación cuando la corriente de alimentación se encuentra a alta presión y existe una gran diferencia entre el coeficiente de permeación [22]. Las membranas pueden ser clasificadas dependiendo del material: orgánicas (tipo polímeros) e inorgánicas (metálicas, cerámicas y zeolitas), pero las membranas orgánicas presentan limitación a altas temperaturas.

A continuación se presentan los procesos donde se pueden utilizar las membranas:

Membranas orgánicas:

- Separación de CO_2 con alta presión y CH_4 .
- Separación de CO_2 y N_2 como parte del proceso post-combustión. En este caso se requieren de etapas posteriores de reciclaje para que el procedimiento sea rentable, de-

bido a que las membranas presentan bajas presiones del flujo y selectividad.

Membranas inorgánicas:

- Para la pre-combustión se utilizan membranas metálicas que realizan la captura a partir de aleaciones Pd.
- En pre-combustión y oxi-combustión se utilizan membranas transportadoras de iones, conductoras de protones y conductoras de oxígeno.

Roda Bounaceur y colaboradores [23] realizaron un trabajo basado en la potencial identificación y las posibles limitaciones del uso de membranas para la recuperación de CO_2 , evidenciando que solo es económicamente viable la tecnología cuando existe una relación de recuperación y composición del filtrado no mayor al 0,8. Para el caso particular de centrales eléctricas de carbono, con un 10% de CO_2 en el gas de combustión, el uso de membranas no es lo suficientemente selectiva para obtener un rendimiento de captura significativo. Sin embargo, en el caso que la selectividad de CO_2/N_2 es menor de 50 y que las corrientes presentan un 20% de CO_2 , el uso de membranas presenta recuperaciones considerables.

2.5 COMBUSTIÓN QUÍMICA DE BUCLES

Este es un método novedoso que permite obtener eficiencias de gas a vapor muy inferiores a las tecnologías de captura ya conocidas, con una disminución en los costos de alrededor del 60% en comparación con los procesos que involucran aminas. La principal ventaja es que el aire y el combustible no se mezclan, evitando separar el CO_2 de las corrientes de gases de escape. Cuenta con un sistema de combustión con transportadores de oxígeno, que tiene dos reactores uno para aire y el otro para combusti-

ble, por lo que no es necesaria una combustión directa. Sin embargo su principal desventaja es el poco nivel de confianza que se tiene actualmente debido a la falta de madurez de la tecnología [24].

DISCUSIÓN

El progreso económico de los países industrializados y subdesarrollos está íntimamente relacionado con el crecimiento de la demanda energética. Por lo tanto, mientras no se generen nuevas tecnologías eficientes en términos económicos y ambientales, se continuará incrementando el uso de combustibles energéticos de tipo fósil para generar la energía requerida. Por consiguiente es necesario controlar las emisiones de gases como el CO₂, generadas en los procesos de combustión, y una de las iniciativas para reducir las es la implementación de tecnologías de captura, secuestro y almacenamiento.

Los métodos actuales de captura presentan ciertas limitaciones operativas, en el caso de los procesos de absorción las principales desventajas se presentan debido a las condiciones de corriente de los gases de escape: un gran volumen, bajas presiones y presencia de impurezas que derivan en una inversión económica elevada en equipos. Para el caso de las membranas presentan limitaciones cuando se trabajan a bajas presiones debido a que la fuerza de separación necesaria del gas sería baja; además este proceso resulta en un mayor gasto energético y menor porcentaje de remoción del CO₂ frente a la absorción química. Una alternativa para los procesos de adsorción sería el uso de nanomateriales, que presentan un potencial para la captura de CO₂. En la actualidad la

mayoría de los procesos de combustión cuentan con una infraestructura energética basada en combustión con aire, en la cual la opción de captura en el proceso de post-combustión presenta gran relevancia para disminuir los focos emisores de CO₂.

CONCLUSIONES

- En este trabajo de revisión sobre las tecnologías de captura de CO₂ en procesos de postcombustión, se presenta de manera general los diferentes procesos y sus principales ventajas. Es importante tener en cuenta las condiciones del proceso como temperatura y presión, para seleccionar la tecnología adecuada para el tipo de gas a tratar, en el caso particular de la absorción química es importante realizar una adecuada selección del disolvente para incrementar los rendimientos de captura.
- El estudio e impacto de las aplicaciones nanotecnológicas pueden presentar aplicaciones muy variadas, pero resultan ser una estrategia retardadora para la captura de gases contaminantes en la industria Oil & Gas.
- De los métodos de captación de CO₂ que existen actualmente a nivel industrial, el método de absorción con soluciones con aminas, es el proceso tradicional para tratamiento de gases y migrar hacia otra tecnología requiere inicialmente una alta inversión en infraestructura, equipos, etc. Sin embargo, otras tecnologías presentan ventajas adicionales que permitiría incrementar la eficiencia del retiro de contaminantes, y en el caso de usar un proceso que involucre la fisisorción y la químisorción, puede ser una alternativa viable para incrementar los rendimientos y selectividad de estos procesos.

REFERENCIAS

- [1] Energy Information Administration, 2017, International Energy Outlook Executive Summary, 14.
- [2] Dumitru Cebrucean, Viorica Cebrucean, Loana Lonel. 2014, CO₂ Capture and Storage from Fossil Fuel Power Plants. *Energy Procedia*, 63, 18-26.
- [3] Akash Sood, Savita Vya, 2017, Carbon Capture and Sequestration-A Review, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 83, 1-10.
- [4] I. Sreedhar, Tanisha Nahar, A. Venugopal and B. Srinivas, 2017, Carbon Capture by Absorption-Path Covered and Ahead, 76, 1080-1107. Akira Kishimoto, Yasuki Kansha, Chihiro Fushimi,
- [5] Atsushi Tsutsumi, 2011, Energy Recuperative CO₂ Gas Separation in Post-Combustion Capture, *Ind. Eng. Chem. Res.* 50,10128-10135.
- [6] Pen-Chi Chiang, Shu-Yuan Pan, 2017, Post-combustion Carbon Capture, Storage, and Utilization, Springer Singapore, 1.
- [7] Mondal P, Dang G.S, Garg M.O. 2011, Syngas Production through Gasification and Cleanup for Downstream Applications-Recent Developments, *Fuel Processing Technology*, 92, 1395-1410.
- [8] Patrick J. Robinson, William L. Luyben, 2010, Integrated Gasification Combined Cycle Dynamic Model: H₂S Absorption/Stripping, Water-Gas Shift Reactors, and CO₂ Absorption/Stripping, *Ind. Eng. Chem. Res.* 49, 4766-4781.
- [9] José D. Figueroa, Timothy Fout, Sean Plasynski, Howard McIlvried, Rameshwar D. Srivastava, 2008, Advances in CO₂ Capture Technology-The U.S Department of Energy's Carbon Sequestration Program, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2,9-20.
- [10] Lionel Dubois, Diane Thomas, 2013, Postcombustion CO₂ Capture by Chemical Absorption: Screening of Aqueous Amine(s)-Based Solvents, *Energy Procedia*, 37, 1648-1657.
- [11] Borja Arias, Gemma S. Grasa, Mónica Alonso, J. Carlos Abanades, 2012, Post-combustion Calcium Looping Process with a Highly Stable Sorbent Activity by Recarbonation, *Energy & Environmental Science*, 6, 7353-7359.
- [12] Mofarahi, Masoud & Khojasteh, Yaser & Khaledi, Hiwa & Farahnak, Arsalan, 2008, Design of CO₂ absorption plant for recovery of CO₂ from flue gases of gas turbine *Energy*, Elsevier, vol. 33(8), pages 1311-1319.
- [13] Abu Zahra, M.R.M, Jansens, P.J, 2009, Carbon Dioxide Capture from Flue Gas: Development and Evaluation of Existing and Novel Process Concepts, Institutional Repository.
- [14] Kim, W. G.; Kang, H. U.; Jung, K. M.; Kim, S. H, 2008, Synthesis of Silica Nanofluid and Application to CO₂ Absorption, *Sep. Sci. Technol*, 43, 3036– 3055.
- [15] Chowdhury S, Balasubramanian R, 2016, Three-Dimensional Graphene-Based Porous Adsorbents for Postcombustion CO₂ Capture, *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 55(29), 7906-7916.
- [16] Daniel Bahamon, Santiago Builes, Mohammad Abu Zahra, Lourdes F. Vega, 2018, 14th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-14, Australia.
- [17] Spigarelli BP, Kawatra SK, 2013, Opportunities and challenges in carbon dioxide

- capture. Journal of CO₂ Utilization,1,69-87.
- [18] Lee K, Mazare A, Schmuki P, 2014, One-Dimensional Titanium Dioxide Nanomaterials: Nanotubes. Chemical Reviews.114(19),9385-9454.
- [19] Kasuga T, Hiramatsu M, Hoson A, Sekino T, Niihara K, 1998,Formation of Titanium Oxide Nanotube, Langmuir.;14(12),3160-3163.
- [20] Ayala Blanco E, García Sánchez CE, Martínez Ortega F, 2018., Adsorción de CO₂ en procesos de post-combustión de gas natural mediante nanotubos de óxido de titanio, XXVI CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE CATÁLISE Portugal.
- [21] Song F, Zhao Y, Zhong Q. Adsorption of carbon dioxide on amine-modified TiO₂ nanotubes. Journal of Environmental Sciences. 2013;25(3):554-560.[21]Bel aissaoui B, [22] Willson D, Favre E, 2012, Post-combustion Carbon Dioxide Capture using Membrane Processes: A Sensitivity Analysis, Procedia Engineering, 44,1191-1195.
- [23] Bounaceur R, Lape N, Roizard D, Vallieres C, Favre E, 2006,Membrane processes for post-combustion carbon dioxide capture: A parametric study. Energy., 31(14)2556-2570.
- [24] Raúl Perez Vega, 2016, Captura de CO₂ en la combustión de carbón con transportes sólidos de oxígeno, Universidad de Zaragoza, España.