



Estudio sobre los diferentes métodos de captura de CO₂ y aplicaciones de la descarga luminiscente anormal

✉ MANUEL ALEJANDRO NAVAS-CIENDÚA^A
ARMANDO SARMIENTO SANTOS^B
BRENDA ALVAREZ^C

RESUMEN: En los últimos años se han presentado grandes cambios en el medioambiente. Las grandes industrias generan contaminación en forma de dióxido de carbono —CO₂—. Por esta razón, las investigaciones se han centrado en procesos de captura del CO₂ con el uso de diferentes técnicas como el sistema de plasma en configuración de descarga de barrera de dieléctrico y la integración de las tecnologías del ciclo del calcio, entre otras. Debido a esto, el objetivo del presente documento es la revisión del método de descarga luminiscente anormal y dar una visión de los métodos y tecnologías de la captura de CO₂.

PALABRAS CLAVE: descarga luminiscente anormal, captura, dióxido de carbono —CO₂—

CÓMO CITAR

Navas-Ciendúa, M. A., Sarmiento, A., & Alvarez, B. (2022). Estudio sobre los diferentes métodos de captura de CO₂ y aplicaciones de la descarga luminiscente anormal. *Revista Habitus: Semilleros de investigación*, 2(4), e13647. <https://doi.org/10.19053/22158391.13647>

RECIBIDO: 11/11/2021 • **EVALUADO:** 01/12/2021
APROBADO: 15/12/2021 • **PUBLICADO:** 01/04/2022



Autor para correspondencia.
manuel.navas@uptc.edu.co

^A Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Colombia).
<https://orcid.org/0000-0002-9615-9520>

^B <https://orcid.org/0000-0003-3382-0104>

^C <https://orcid.org/0000-0002-7905-0945>

HOW TO CITE

Navas Ciendúa, M. A., Armando,
& Alvarez, B.(2022). Study on the
different methods of capturing CO₂
and applications of abnormal glow
discharge. *Revista Habitus: Semilleros
de investigación*, 2(4), e13647. [https://
doi.org/10.19053/22158391.13647](https://doi.org/10.19053/22158391.13647)

Study on the different methods of capturing CO₂ and applications of abnormal glow discharge

ABSTRACT: In recent years there have been great changes in the environment. Large industries generate pollution in the form of carbon dioxide –CO₂–. For this reason, research has focused on CO₂ capture processes with the use of different techniques such as the plasma system in dielectric barrier discharge configuration and the integration of calcium cycle technologies, among others. Due to this, the objective of this document is to review the abnormal glow discharge method and give an overview of CO₂ capture methods and technologies.

KEYWORDS: abnormal glow discharge, capture, carbon dioxide (CO₂)

Estudo sobre os diferentes métodos de captura de CO₂ e aplicações de descarga com luminiscente anormal

RESUMO: Nos últimos anos, houve grandes mudanças no ambiente. Grandes indústrias geram poluição sob a forma de dióxido de carbono -CO₂-. Por esta razão, a pesquisa se concentrou nos processos de captura de CO₂ com o uso de diferentes técnicas, como o sistema de plasma na configuração de descarga da barreira dielétrica e a integração de tecnologias do ciclo do cálcio, entre outras. Devido a isso, o objetivo do presente documento é revisar o método de descarga com luminiscente anormal e dar uma visão geral dos métodos e tecnologias de captura de CO₂.

PALAVRAS-CHAVE: descarga com luminiscente anormal, captura, dióxido de carbono -CO₂-.

La polución en los últimos años ha tenido un gran crecimiento en los países donde la industrialización juega un papel fundamental para el desarrollo de las economías. La fabricación de productos genera polución en forma de dióxido de carbono CO_2 , que es la principal causa del calentamiento global. Un aporte innovador que beneficiaría la captura de CO_2 sería la técnica de descarga luminiscente anormal (DLA) en óxido de hierro puro, debido a las propiedades que presenta ese sustrato.

Las consecuencias negativas se deben al aumento del efecto invernadero, acrecentado por las emisiones de gases procedentes de la actividad humana, que han crecido sin cesar desde la época preindustrial (Serrano, 2018). Desde 1750, momento que se considera como el inicio de la era industrial, las concentraciones atmosféricas de gases como el CO_2 , CH_4 y N_2O han aumentado de manera considerable debido a las actividades humanas e industriales, las cuales hoy son mucho mayores que en la era preindustrial.

El CO_2 se considera el contribuyente más importante al calentamiento global una vez que se libera a la atmósfera, ya que representa el 64 % del aumento del efecto invernadero (Kumar & Saxena, 2014; Vega, 2016). En la actualidad, existe una amplia evidencia científica que respalda la afirmación de que el calentamiento global es inducido por el hombre (Poggi, 2018). La emisión de CO_2 ha ido aumentando por varias décadas como resultado del creciente uso de combustibles fósiles por diferentes sectores de la industria. Según algunos estudios recientes, si el uso de combustibles fósiles continúa a este ritmo o aumenta durante los próximos cincuenta años, la concentración de CO_2 en la atmósfera podría llegar a 580 ppm (Kumar & Saxena, 2014), lo cual causaría efectos globales significativos en organismos vivos y ecosistemas. El protocolo de Kioto, adoptado en 1997, promueve la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, en particular de CO_2 (Proaño, 2016). Así, este tratado ha llevado al desarrollo de nuevas tecnologías mejoradas de captura de CO_2 .

Las tecnologías actuales de captura se basan en métodos físicos o químicos. En los métodos físicos, el CO_2 se absorbe en diferentes condiciones de presión y de temperatura por un sólido o un líquido y es liberado por los absorbentes en descompresión y/o calentamiento. Actualmente se estudia la captura de CO_2 de las corrientes de combustión de centrales eléctricas de carbón, ya que contribuyen de forma continua a la formación de CO_2 (Moreno, 2019). Hay tres principales enfoques tecnológicos para la captura de CO_2 : post-, oxi- y precombustión. Los sistemas de postcombustión capturan CO_2 de la corriente de gas de combustión rica en N_2 producida por la quema de combustibles fósiles en el aire. La oxicombustión utiliza una corriente pura de O_2 en lugar de aire para quemar carbón. Por ende, se produce gas rico en CO_2 .



Por otro lado, los sistemas de precombustión son diseñados principalmente para eliminar el CO_2 del gas de síntesis $-\text{CO} + \text{H}_2-$ antes de su combustión para la producción de energía (Queijo, 2017).

Hoy en día se evalúa una variedad de tecnologías por su capacidad para capturar el CO_2 . La tecnología más comercial es la absorción de aminas, pero es costosa, consume mucha energía y, si se implementa, daría lugar a grandes aumentos en el costo de producción de electricidad. También la industria del acero consume una gran cantidad de combustibles fósiles, lo que la convierte en una de las más intensivas consumidoras de energía en el subsector industrial, pues representa alrededor del 7 % de la emisión total de CO_2 (Pascal, 2016). También se demostró que los óxidos de hierro tienen sitios activos expuestos en la superficie que pueden reaccionar con las moléculas gaseosas de CO_2 (Castro, 2021).

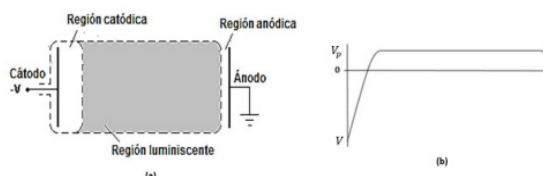
Por lo tanto, el objetivo es utilizar los principios físicos que rigen la DLA, al tener en cuenta factores importantes de presión y temperatura, mediante la introducción de hidrógeno en el reactor de plasma para crear una intensa excitación e ionización de la mezcla de este gas. Para tal fin se utilizará como sustrato la hemanita $-\text{Fe}_2\text{O}_3-$, conocida como óxido de hierro (III), la cual tiene una masa de 70 % Fe y 30 % O. Las propiedades que presenta este compuesto—como su densidad, masa molar y punto de fusión— lo convierten en una buena elección para la captura de CO_2 (Gutiérrez-Bonilla *et al.*, 2017).

Metodología

En esta revisión se pretende dar una visión de los métodos y tecnologías de la captura de CO_2 . Este trabajo aportará al medioambiente mediante el método de la DLA, ya que la problemática ambiental ha tenido un crecimiento considerable en los últimos años. Por esta razón, surge una pregunta de gran importancia en el desarrollo de la revisión: ¿cómo capturar CO_2 mediante el método de la DLA? Esta pregunta surge debido a que no hay estudios que empleen dicho método. Por ello, se hace una breve descripción de cómo capturar el CO_2 . Para tal fin se implementa el método de la DLA, que se obtiene en ciertas condiciones de presión, de separación entre electrodos y de los tipos de elementos que integran la atmósfera gaseosa que dan lugar a tres regiones principales: región catódica, región luminiscente y región anódica. La figura 1(a) muestra uno de los montajes experimentales más recurrentes con descargas luminiscentes en régimen anormal. En la figura 1(b) se ilustra la distribución del potencial entre los electrodos (Panguetna *et al.*, 2018; Cepeda *et al.*, 2014).

Figura 1

DLA: regiones (a) y distribución de potencial entre los electrodos (b)



Nota. Tomado de *Introdução de Nitrogênio em Ligas Sinterizadas de Fe-Cr, Submetidas a uma Descarga Luminescente Anormal* [Tesis de Doctorado, Universidade Federal de Santa Catarina] de A. Santos, 2003, Repositório Institucional da UFSC, p. 17 (<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/85562/195715.pdf?sequence=1&isAllowed=y>).

El método de DLA se da bajo la diferencia de corriente y voltaje que se encuentra en la región del plasma. En la descarga hay tres regiones principales: la región catódica, la luminiscente y la anódica.

- Región catódica: es una región fundamental en la descarga, donde se presenta una caída de potencial desde el cátodo hasta el borde límite de la región de luminiscencia negativa. En esta región, la corriente, en su mayoría, se debe a los iones positivos y presenta una carga espacial positiva (Santos, 2003).
- Región luminiscente anormal: es una región de gran interés experimental debido a sus cualidades, ya que los electrones secundarios, generados en el cátodo y acelerados en la región catódica, transfieren su energía cinética a los átomos o moléculas neutras. Esto genera una tasa de excitación y ionización elevada del gas en esta región, lo que da como resultado su gran luminosidad característica. La densidad electrónica disminuye debido a la recombinación y difusión hasta que la carga total se torna cero, con un potencial constante y campo eléctrico cero (Santos, 2003).
- Región anódica: el ánodo de la DLA sirve para recolectar los electrones que provienen de la luminiscencia anormal, de manera que se forma una carga espacial para ajustar las densidades de corriente electrónica e iónica de la luminiscencia a los valores requeridos para conducir la descarga hacia la superficie anódica (Santos, 2003).

Para la revisión bibliográfica, se recurrió a diferentes bases de datos y buscadores como Science Direct, Springer, Scielo y demás sitios web. Las bases de datos consultadas son confiables, ya que allí se publican muchos trabajos de relevancia investigativa a nivel internacional. Este artículo de revisión consta de dos temas principales: captura de CO_2 y DLA.

Para la recopilación del estudio de captura de CO_2 , se hizo una búsqueda en las diferentes bases de datos con palabras clave como *captura de CO_2* . Esto arrojó 55 136 resultados. Luego se filtraron por el año de publicación,



desde 2016 a 2021. Así se obtuvo un resultado de 26 351. Como se observa que son bastantes artículos, se tomaron como base sesenta.

Se leyeron los resúmenes, su introducción, el método de captura de CO_2 y las conclusiones. Para hacer un resumen ordenado, se realizó una matriz de revisión que establecía el objetivo general, el método de análisis, resultados, título, autor y año, para saber si era adecuado para utilizarlo en el artículo.

Los criterios para la selección de los artículos fue que hablaran de los métodos más utilizados últimamente para la captura de CO_2 , entre ellos: el método electroquímico, el ciclo del calcio (CaL, por sus siglas en inglés para *calcium looping*) y absorbentes. También se tuvo en cuenta cómo estos métodos contribuyen al medioambiente, lo cual es una parte central de la revisión.

Para el método de DLA, se realizó una búsqueda menos densa debido a que hay información reducida sobre él, ya que es un método nuevo de captura y formación de materiales. También se recurrió a fuentes como Science Direct y Google Académico. Se seleccionaron artículos que emplearan esta técnica, para mirar sus beneficios. Se destacan investigaciones como las de depósito de grafeno y deposición de materiales sintéticos, debido a que la técnica de DLA presenta una disminución en el tiempo y en el consumo de energía.

Resultados

Captura de CO_2

Se han desarrollado diferentes métodos y tecnologías para la captura de CO_2 , basados en electroquímica, CaL, calcinación y extracciones con absorbentes orgánicos e inorgánicos. Los dos primeros implican ciclos térmicos, en donde un nucleófilo captura CO_2 de corrientes de gas impuro, que sigue un proceso de extracción térmica que libera CO_2 y regenera al nucleófilo, los cuales buscan bajos costos con buenas eficiencias de capturas de CO_2 (Legrand *et al.*, 2018; Rahimi *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2019; Zhu *et al.*, 2019).

Método electroquímico. Rahimi *et al.* (2020) utilizaron K_2CO_3 como absorbente en la captura de CO_2 . Se empleó un enfoque electroquímico que constaba de electrodos que intercalaban y desintercalaban protones al aprovechar la sensibilidad al pH del equilibrio, en donde el mecanismo de absorción se basa en la hidratación de CO_2 . Es decir, el CO_2 se absorbe como bicarbonato $-\text{HCO}_3^-$ y carbonato $-\text{CO}_3^{2-}$, lo cual envía una corriente con alta carga de CO_2 a la celda electroquímica donde está el ánodo para la desintercalación de protones a la solución. Así disminuye el pH y desplaza el

equilibrio $\text{CO}_2(\text{aq})/\text{HCO}_3^-(\text{aq})/\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$ para formar CO_2 . El electrolito de fondo utilizado es cloruro de potasio —KCl—. En este caso, los iones Cl pasan a través de una membrana de intercambio aniónico, lo que asegura la neutralidad de las cargas (Liu *et al.*, 2020; Rahimi *et al.*, 2020; Xie *et al.*, 2020).

Este mecanismo para la captura de CO_2 y su consiguiente liberación se logra mediante absorción química: regeneración electroquímica del absorbente mediante un proceso de concentración de protones. En este caso, los factores que pueden afectar la reacción son las variaciones del pH, ya que una disminución en este significa que no se ha dado una intercalación de protones en la reacción de reducción, la polaridad del electrodo, pues debe evitarse una saturación del cátodo y agotamiento del ánodo.

Por otro lado, Küngas (2020) escribió sobre la comparación de tecnologías de electrólisis de baja y alta temperatura en la reducción electroquímica de CO_2 para su conversión en CO, con el uso de electrolizadores. La electrólisis del óxido sólido utiliza un electrolito de material cerámico sólido —zircona estabilizada con itria y zircona estabilizada con escandia, ceria dopada con gadolinia o ceria dopada con samaria— a temperaturas entre los 700 °C y 900 °C. En tal caso, estos materiales conducen iones de óxido que permanecen impermeables al oxígeno gaseoso y a los electrones. Además, el material utilizado en los electrodos de combustible normalmente es el Ni metálico, pues actúa como conductor electrónico y catalizador, mientras que el material del electrolito proporciona la conductividad iónica y estabiliza las microestructuras del electrodo. El funcionamiento depende del cambio constante del suministro de electricidad (Bavel *et al.*, 2020; Garg *et al.*, 2020; Küngas, 2020).

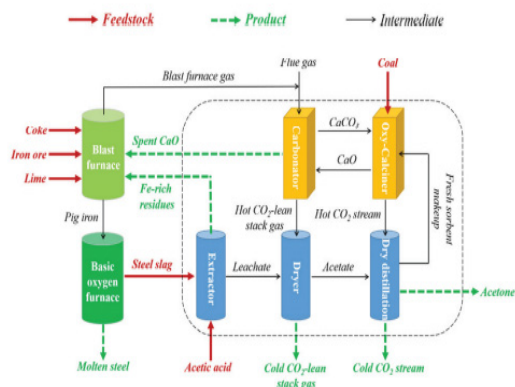
Para la electrólisis de carbonato fundido, se utiliza una masa fundida de carbonato. El potencial catódico aplicado para las condiciones operativas requeridas en el proceso es entre 500 °C y 800 °C. Si se combinan los electrolitos de $\text{Li}_2\text{O}/\text{Li}_2\text{CO}_3$ fundido, un cátodo de titanio y un ánodo de grafito, hay buenos resultados. Una ventaja de este método es que la alimentación de CO_2 y los productos de CO y O_2 no se mezclan, lo que permite extraer los gases puros de la celda. Un factor que influye en la técnica es el contenido de SO_2 en el gas de alimentación. Por último, la electrólisis a baja temperatura utiliza soluciones acuosas ácidas de KHCO_3 . Los electrolitos son membranas selectivas de iones sólidos —nafion y sustainion— (Hauch *et al.*, 2020; Mogensen *et al.*, 2019). Una desventaja del método es que utiliza un ambiente ácido que reduce bastante los materiales del cátodo hacia el CO_2 . Como resultado, casi toda la corriente es utilizada para la reacción de desprendimiento de hidrógeno. Por ello, es recomendable tener condiciones alcalinas o de pH neutro.



CaL. Debido a los problemas ambientales producto de la industrialización global, se requiere implementar las tecnologías de captura de CO₂ en los sectores industriales, tales como las tecnologías del CaL y de reciclaje de desechos en la producción de hierro y acero. La captura y almacenamiento de carbono es una tecnología actual que permitiría a los sectores de la industria lograr una disminución considerable de las emisiones de CO₂ (Alonso *et al.*, 2017; Ma *et al.*, 2016). Tian *et al.* (2016) han desarrollado un proceso eficiente de captura de CO₂ (figura 2), el cual integra las tecnologías de reciclaje de residuos y CaL en la producción de hierro y acero para ayudar a lograr la reducción simultánea de CO₂ y la minimización de la escoria de acero en la industria del hierro y el acero. En este sistema, el Ca y el Fe de la escoria de acero se separan mediante la lixiviación de la escoria de acero con el uso de una solución de ácido acético —extracción ácida— con Ca extraído en el lixiviado y Fe concentrado en los residuos.

Figura 2

Esquema general del proceso integrado de captura de CO₂ y valorización de la escoria de acero propuesto para su uso en la industria siderúrgica



Nota. Tomado de “Highly efficient CO₂ capture with simultaneous iron and CaO recycling for the iron and steel industry” de S. Tian, J. Jiang, F. Yan, K. Li, X. Chena y V. Manovic, 2016, Green Chemistry, 18(14), p. 5. (<https://doi.org/10.1039/C6GC00400H>).

La captura y el almacenamiento de carbono poscombustión (CACP) es una parte esencial de la incorporación de las industrias de uso intensivo de energía —como las centrales eléctricas de carbón y la producción de cemento, de hierro y de acero— en una estrategia de este tipo, ya que siguen siendo las tres principales fuentes antropogénicas de emisión de CO₂ (Tian *et al.*, 2016). El CaL es uno de los métodos más nuevos y prometedores que se han estudiado ampliamente y parece ser una tecnología de CACP importante y de rápido desarrollo. Una ventaja clave de este proceso es que la captura de CO₂ va acompañada de un reciclaje simultáneo de Fe y CaO

de la escoria de acero residual. Por ende, los sorbentes de CO₂ basados en CaO de alta pureza se obtuvieron a partir de escoria de acero con el uso de un método de precipitación con extracción ácida. En una síntesis, la muestra de escoria de acero se mezcló con una solución 1 M de ácido acético en una relación sólido/líquido de 1 g por 10 ml. La mezcla se agitó mecánicamente a temperatura ambiente durante 0,5 h (Tian *et al.*, 2016).

En los resultados obtenidos por este método se evidencia que, en el reciclaje de CaO y Fe de la escoria de acero, el Ca y el Mg son los principales elementos extraídos de la escoria de acero. Según Tian *et al.* (2016), el tiempo de extracción y la relación sólido/líquido no dieron como resultado ningún cambio significativo en la cantidad de elementos extraídos de la muestra de escoria, ya que se produjeron aproximadamente 0,27 g de sorbentes de CO₂ por gramo de escoria de acero utilizada. Esto es bueno, porque se requiere un tiempo de extracción más corto y una relación sólido/líquido más alta para la aplicación práctica. En ese estudio se recuperó mineral de hierro de alta calidad con un contenido de Fe del 55,1 % al 70,6 % de la escoria residual. Así, en estudios experimentales se ha propuesto y se ha demostrado la viabilidad de un proceso de captura de CO₂ en la industria del hierro y del acero.

Las investigaciones realizadas por Su *et al.* (2018) proponen un nuevo proceso de CaL integrado con un tratamiento de arcilla blanqueadora gastada (ABG), mediante el cual los combustibles y/o el calor de la regeneración de ABG proporcionan energía suplementaria para el proceso de calcinación. Además, la ABG regenerada podría usarse para sintetizar sorbentes mejorados basados en CaO. Se prepararon muestras compuestas con diversas proporciones de dopaje junto con la ABG regenerada mediante un proceso de peletización. Todos los gránulos se sometieron a pruebas de análisis termogravimético, empleando condiciones de reacción severas para determinar las relaciones de dopaje óptimas y el método de regeneración para los sorbentes basados en ABG (Erans *et al.* 2016; Su *et al.*, 2018). En los resultados de este estudio, los gránulos que contienen componentes combustibles mostraron una mayor absorción de CO₂. El sorbente L-10PC preparado —90 % CaO/10 % ABG pirolítica— logró una absorción final de CO₂ de 0,164 g(CO₂) g(sorbente calcinado)⁻¹ (Rogelj *et al.*, 2016), después de 20 ciclos, que fue un 67,3 % más alta que la de partículas de piedra caliza natural (Su *et al.*, 2018). Los autores propusieron un sistema de posible captura de CO₂ con la reutilización de ABG con la cual se preparan sorbentes a base de cal eficientes con ABG regenerada. Al mismo tiempo, el combustible y el calor de la regeneración de ABG podrían servir como energía suplementaria para el proceso de calcinación. Se investigaron tres métodos de regeneración:



la pirólisis, la calcinación y la extracción con solventes orgánicos (Su *et al.*, 2018).

Existen diferentes caminos para la transformación del CO_2 en combustibles sintéticos y sustancias químicas valiosas mediante procesos biológicos o químicos. Dado que el CO_2 es una molécula muy estable y relativamente inerte, a menudo se combina con hidrógeno sobre un catalizador para impulsar la reacción deseada (Roy & Peter, 2020; Roy *et al.*, 2018). Al usar hidrógeno “renovable” obtenido de fuentes de energía libres de carbono, se pueden obtener nuevos productos de interés comercial. Con este enfoque, el CO_2 ya no debería considerarse un contaminante, sino una fuente de carbono atractiva que actúa como materia prima para la síntesis posterior (Chauvy *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2019; Zimmermann & Schomäcker, 2017). Los catalizadores basados en Ru, Co, Ni y Rh se reportan principalmente como efectivos para la metanización de CO_2 . Algunos estudios también se centraron en la optimización de sistemas basados en Fe para este proceso (Kirchner *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2021; Sreedhar *et al.*, 2019; Thema *et al.*, 2019).

En la investigación de Kierzkowska-Pawlak *et al.* (2021) sobre la hidrogenación de CO_2 para producir CO y H_2O , conocida como reacción de desplazamiento inverso de agua y gas, esta se considera una importante vía de valorización del CO_2 (Bausá, 2020; Kierzkowska-Pawlak *et al.*, 2021; Martínez, 2018; Sánchez-Contado, 2017). Kierzkowska-Pawlak *et al.* (2021) proponen los catalizadores de película fina a base de óxidos de hierro y cobalto para tal fin, en la cual se preparó una serie de nanocompuestos de Fe-Co mediante la deposición química en fase de vapor mejorada con plasma, a partir de precursores orgánicos de cobalto y hierro sobre un soporte de malla de alambre. Resaltan que las películas que contienen las estructuras cristalinas de CoO y $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$, así como la serie de nanocompuestos compuestos por mezclas de estos óxidos —CoO, Fe_2O_3 y Fe_3O_4 —, revelaron una actividad diferente en la hidrogenación de CO_2 . El catalizador basado en CoO exhibió una alta actividad hacia el metano, mientras que el sistema $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$ fue mucho menos activo y convirtió el CO_2 principalmente en CO.

Absorbentes. Otro estudio importante realizado por Mora *et al.* (2019), en el cual usaron óxidos de hierro como absorbentes eficientes para la captura de CO_2 . Se estudiaron las reacciones de captura/liberación de CO_2 con el uso de magnetita — Fe_3O_4 — y hematita — Fe_2O_3 — como sorbentes. Se investigó la cinética de las reacciones químicas activadas mecánicamente entre los óxidos de hierro y el CO_2 en función de la presión del CO_2 y los parámetros del proceso del molino de bolas planetario (Gayán & Pérez-Vega, 2019; Lira, 2017; Mora *et al.*, 2019). Este estudio presenta un método novedoso para capturar CO_2 por mezcla de materias primas utilizadas en la industria del

acero $-\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}$ y $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Fe}$ —. Hubo incrementos en la formación de siderita —capacidad de captura de CO_2 — durante el molino planetario de bolas. Las condiciones se lograron mediante aumentos de presión, de velocidad de revolución del molino de bolas y de tiempo de reacción. La capacidad de captura de CO_2 en Fe_2O_3 y sistema Fe fue mayor en comparación con el Fe_3O_4 y el sistema Fe en las mismas condiciones de presión, temperatura y tiempo de reacción.

Descarga luminiscente anormal

La DLA es el método que se quiere implementar para la captura de CO_2 . A continuación, se mencionarán algunas de las aplicaciones investigativas en las que se ha utilizado este método, ya que es importante resaltar su relevancia.

Se realizó una investigación del depósito de grafeno en DLA en corriente continua. Se utilizó una mezcla de 60 % Ar, 5 % C_2H_2 y 35 % H_2 como atmósfera estable de gas, a una presión de 2,0 Torr. Se usaron como sustrato láminas de cobre electrolítico, en los cuales se obtuvieron capas de depósito de grafeno con grandes concentraciones de defectos en atmósferas con etino al 5 % a una temperatura de 600 °C, durante 5 s de tratamiento (Álvarez et al., 2019a).

En el estudio realizado por Álvarez *et al.* (2019b) se utilizó la aplicación de la DLA en la deposición de materiales sintéticos, debido a que esta técnica representa una disminución en el tiempo y en el consumo de energía del proceso, ya que el calentamiento se realiza directamente por el bombardeo de los iones y átomos neutros sobre la superficie del cátodo donde normalmente se encuentra la muestra. Se utilizó la técnica de DLA para estudiar la posibilidad de formación de depósitos de carbono en un sustrato de cobre, a partir de una atmósfera de argón, hidrógeno y acetileno, a la temperatura de 600 °C, en el cual obtuvieron depósitos de grafito, grafeno y un compuesto polimérico de acetileno (Álvarez et al., 2019b). Se obtuvieron diferentes estructuras de carbono que dependían de los parámetros de deposición que fueron identificados por diferentes técnicas como espectroscopia IR y espectroscopia Raman.

En la investigación de Supelano *et al.* (2017), buscaron aprovechar la generación de calor por medio de la descarga luminiscente de baja presión en corriente continua, debido a la transferencia de energía cinética desde el plasma hacia los electrodos. Para ello, se diseñó un reactor cilíndrico que genera una descarga luminiscente de baja presión en una atmósfera de argón. El cátodo de la descarga está constituido por el electrodo interno; mientras que el ánodo, y al mismo tiempo la pared de la cámara, por un



cilindro metálico externo, concéntrico al cátodo. Para mantener la descarga, se utilizó una fuente de corriente continua pulsada. La descarga se generó a varias corrientes y en diferentes atmósferas gaseosas $\text{—N}_2, \text{H}_2$ y Ar— . Por ende, se diseñó y se puso en funcionamiento el reactor para aplicar la descarga luminiscente al calentamiento de líquidos con eficiencia comparable a la de los dispositivos resistivos comerciales. Este dispositivo funciona en el régimen de la DLA y su comportamiento característico está en función de la presión y del tipo de gas a través del cual se genera la descarga. En términos de eficiencia, con atmósfera de nitrógeno a 2 Torr y 0,45 A, se obtuvo el valor más alto.

Por otro lado, Murashkina *et al.* (2019) investigaron la estabilidad cíclica de la fase TiCr_2 Laves de tipo C36 sintetizada en el plasma de DLA. La fusión de polvos metálicos de titanio-cromo por el plasma de descarga luminiscente conduce a la formación de la fase de Laves C36 hexagonal de TiCr_2 con parámetros de red $a \frac{1}{4} 4,928 \text{ \AA}$ y $c \frac{1}{4} 15,983 \text{ \AA}$. El método de hidrogenación deshidrogenación se utilizó para triturar y aumentar la capacidad de sorción efectiva de la fase TiCr_2 Laves de tipo C36. Se demostró que la síntesis de polvos metálicos de titanio-cromo en el plasma de DLA conduce a la formación de la fase de Laves C36 hexagonal de TiCr_2 con parámetros de red nombrados anteriormente. La formación de la fase C36 Laves está condicionada por un enfriamiento lento de la masa fundida, debido al flujo de calor de la superficie del metal fundido por medio de la emisión infrarroja del material del crisol. Los resultados de XRD y EDX proporcionan una evidencia de ausencia de impurezas en la aleación de TiCr_2 obtenida. También se logró la formación de la aleación de la fase de Laves en el plasma de descarga luminiscente, que permite la producción de materiales de almacenamiento de hidrógeno basados en titanio (Turrado, 2019; Murashkina *et al.*, 2019).

Conclusión

En la presente revisión se dio cuenta de los métodos y técnicas más adecuados para la captura de CO_2 . Se resalta el método de la DLA. Se han desarrollado diferentes métodos y tecnologías para la captura de CO_2 , basados en electroquímica, CaL, calcinación y extracciones con absorbentes orgánicos e inorgánicos. Este artículo resalta la importancia de la captura de CO_2 con la implementación del método DLA. Este estudio es importante para la contribución al mejoramiento del medioambiente.

Referencias

- Alonso, M., Arias, B., Méndez, A., Fuentes, F., & Abanades, J. (2017). Screening CO₂ capture test for cement plants using a lab scale Calcium Looping pilot facility. *Energy Procedia*, (114), 53-56. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1146>
- Álvarez, B., Sarmiento-Santos, A., & Hernández, Y. (2019a). Graphene deposit in direct current abnormal glow discharge. *Journal of Physics: Conference Series*, 1386, 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1386/1/012014>
- Álvarez, B., Sarmiento-Santos, A., & Hernández, Y. (2019b). Carbon structures obtained from acetylene in a continuous current abnormal glow. *Journal of Physics: Conference Series*, 1386, 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1386/1/012041>
- Bausá, N. (2020). *Electrolizadores de alta temperatura basados en cerámicas protónicas* [Tesis Doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/147114>
- Bavel van, S., Verma, S., Negro, E., & Bracht, M. (2020). Integrating CO₂ Electrolysis into the Gas-to-Liquids–Power-to-Liquids Process. *ACS Energy Letters*, 5(8), 2597-2601. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.0c01418>
- Castro, D. (2021). *Estudio de catalizadores basados en hierro soportados para la hidrogenación directa de CO₂ a hidrocarburos* [Trabajo de Fin de Máster, Universidad Politécnica de Valencia]. RiuNet Repositorio UPV. <https://riunet.upv.es/handle/10251/158895>
- Cepeda, J., Sarmiento, A., & Supelano, I. (2014). Estudio del Comportamiento I vs. V de la descarga luminiscente de baja presión en corriente continua y corriente continua pulsante en un reactor tipo calorímetro. *Ciencia en Desarrollo*, 5(1), 7-13. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-74882014000100001
- Chauvy, R., Meunier, N., Thomas, D., & Weireld de, G. (2019). Selecting emerging CO₂ utilization products for short- to mid-term deployment. *Applied Energy*, 236, 662-680. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.096>
- Erans, M., Beisheim, T., Manovic, V., Jeremias, M., Patchigolla, K., Dieter, H., Duana, L., & Anthony, E. (2016). Effect of SO₂ and steam on CO₂ capture performance of biomass-templated calcium aluminate pellets. *Faraday Discussions*, (192), 97-111. <https://doi.org/10.1039/C6FD00027D>
- Garg, S., Li, S., Weber, A., Ge, L., Li, L., Rudolph, V., Wang, G., & Rufford, T. (2020). Advances and challenges in electrochemical CO₂ reduction processes: an engineering and design perspective looking beyond new catalyst materials. *Journal of Materials Chemistry*, (8), 1511-1544. <https://doi.org/10.1039/C9TA13298H>
- Gayán, P., & Pérez-Vega, R. (2019). Tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂: Chemical Looping Combustion. *Aragonito. Revista del Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Minas de Aragón*, (29), 35-39. <https://digital.csic.es/handle/10261/205951>
- Gutiérrez-Bonilla, E., Granados-Correa, F., Sánchez-Mendieta, V., & Morales-Luckie R. (2017). MgO-based adsorbents for CO₂ adsorption: Influence of structural and textural properties on the CO₂. *Journal of Environmental Sciences*, (57), 418-428. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.11.016>
- Hauch, A., Küngas, R., Blennow, P., Hansen, A., Hansen, J., Mathiesenand, B., & Mogensen, M. (2020). Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis. *Science*, 370(6513). <https://doi.org/10.1126/science.aba6118>
- Kierzkowska-Pawlak, H., Ryba, M., Fronczak, M., Kapica, R., Sielski, J., Sitarz, M., Zajac, P., Łyszczarz, K., Tyczkowski, J., & Tyczkowski, J. (2021). Enhancing CO₂ Conversion to CO over Plasma-Deposited Composites Based on Mixed Co and Fe Oxides. *Catalysts*, 11(8), 883. <https://doi.org/10.3390/catal11080883>
- Kirchner, J., Baysal, Z., & Kureti, S. (2020). Activity and Structural Changes of Fe-based Catalysts during CO₂ Hydrogenation towards CH₄ – A Mini Review. *ChemCatChem*, 12(4), 981-988. <https://doi.org/10.1002/cctc.201901956>
- Kumar, S., & Saxena, S. (2014). A comparative study of CO₂ sorption properties for different oxides. *Mater Renew Sustain Energy*, 3(30). <https://doi.org/10.1007/s40243-014-0030-9>



- Küngas, R. (2020). Review—Electrochemical CO₂ Reduction for CO Production: Comparison of Low- and High-Temperature Electrolysis Technologies. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(4), 044508. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab7099>
- Lee, W., Li, C., Prajitno, H., Yoo, J., Patel, J., Yang, Y., & Lima, S. (2021). Recent trend in thermal catalytic low temperature CO₂ methanation: A critical review. *Catalysis Today*, 368, 2-19. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.02.017>
- Legrand, L., Schaetzle, O., Kler de, R., & Hamelers, H. (2018). Solvent-Free CO₂ Capture Using Membrane Capacitive Deionization. *Environmental Science & Technology*, 52(16), 9478-9485. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00980>
- Lira, S. (2017). *Captura de CO₂ en cenizas de combustión de biomasa* [Tesis Doctoral, Pontificia Universidad Católica de Chile]. Repositorio UC. <https://repositorio.uc.cl/xmlui/handle/11534/21387>
- Liu, M., Yi, Y., Wang, L., Guo, H., & Bogaerts, A. (2019). Hydrogenation of Carbon Dioxide to Value-Added Chemicals by Heterogeneous Catalysis and Plasma Catalysis. *Catalysts*, 9(3), 275. <https://doi.org/10.3390/catal9030275>
- Liu, Y., Ye, H., Diederichsen, K., Voorhis van, T., & Hatton, T. (2020). Electrochemically mediated carbon dioxide separation with quinone chemistry in salt-concentrated aqueous media. *Nature Communications*, (11), 2278. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16150-7>
- Ma, X., Li, Y., Shi, L., & Wang, Z. (2016). Fabrication and CO₂ capture performance of magnesia-stabilized carbide slag by by-product of biodiesel during calcium looping process. *Applied Energy*, (168), 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.080>
- Martínez, P. (2018). *Estudio en planta piloto de la captura e hidrogenación a combustibles de CO₂ promovidas electroquímicamente* [Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. E-Prints Complutense. Repositorio Institucional de la UCM. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/48948/1/T40103.pdf>
- Mogensen, M., Chen, M., Frandsen, H., Graves, C., Hansen, J., Hansen, K., Hauch, A., Jacobsen, T., Jensen, S., Skafte, T., & Sun, X. (2019). Reversible solid-oxide cells for clean and sustainable energy. *Clean Energy*, 3(3), 175-201. <https://doi.org/10.1093/ce/zkz023>
- Mora, E., Sarmiento, A., Vera, E., Drozd, V., Durygin, A., Chen, J., & Saxena, S. (2019). Óxidos de hierro como absorbentes eficientes para la captura de CO₂. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(3), 2944-2956. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.05.002>
- Moreno, S. (2019). *Estudio de sistemas de captura de CO₂ y métodos de concentración de CO₂ en corrientes gaseosas aplicados a ciclos combinados* [Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Sevilla]. idUS. Depósito de Investigación de la Universidad de Sevilla. <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/100929/TFG-2427-MORENO%20SANZ%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Murashkina, T., Syrtanov, M., Laptev, R., & Lider, A. (2019). Cyclic stability of the C36-type TiCr₂ Laves phase synthesized in the abnormal glow discharge plasma under hydrogenation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(13), 6709-6719. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.150>
- Panguetna, C., Tabi, C., & Kofané, T. (2017). Electronegative nonlinear oscillating modes in plasmas. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, (55), 326-337. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2017.07.014>
- Pascal, R. (2016). *Impacto de la directiva europea de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en industrias intensivas en energía: aplicación a la industria cloro-álcali* [Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Cantabria]. UCrea. Repositorio Abierto de la Universidad de Cantabria. <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/8545/RP.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Poggi, O. (2018). *Cumplimiento del Protocolo de Kioto ante el cambio climático y calentamiento global para prevenir y minimizar desastres naturales en el Perú 2014-2016*. Universidad San Martín de Porres.
- Proaño, D. (2016). *El cambio climático y su mitigación: Análisis de la eficiencia de los mercados de carbono en el período 2008-2012* [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. Repositorio PUCE. <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/12520/TESIS%20DE%20GRADO%20Diego%20Fernando%20Proa%C3%B1o%20Pozo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Queijo, A. (2017). *Sistemas de captura de CO₂* [Trabajo de Fin de Grado, Universidade da Coruña]. Repositorio da UDC. https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/19925/Queijo_Fraga_Adrian_TFM_2017.pdf.pdf?sequence=2&isAllowed=y

- Rahimi, M., Catalini, G., Hariharan, S., Wang, M., Puccini, M., & Hatton, A. (2020). Carbon Dioxide Capture Using an Electrochemically Driven Proton Concentration Process. *Cell Reports Physical Science*, 1(4). <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100033>.
- Rogelj, J., Elzen den, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., Schaeffer, R., Sha, F., Riahi, K., & Meinshausen, M. (2016). Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature*, 534(7609), 631-639. <https://doi.org/10.1038/nature18307>
- Roy, S., & Peter, S. (2020). Thermochemical CO₂ Reduction. En S. George, C. Narayana, & C. Rao (Eds.), *Advances in the chemistry and physics of materials: overview of selected topics* (pp. 399-428). World Scientific. https://doi.org/10.1142/9789811211331_0017
- Roy, S., Cherevotan, A., & Peter, S. (2018). Thermochemical CO₂ Hydrogenation to Single Carbon Products: Scientific and Technological Challenges. *ACS Energy Letters*, 3(8), 1938-1966. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.8b00740>
- Sánchez-Contador, M. (2017). *Diseño y comportamiento de un catalizador CORE-SHELL en la síntesis directa de dimetil éter con valorización de CO₂* [Disertación Doctoral, Universidad del País Vasco]. Archivo Digital Docencia Investigación. https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/25087/TESIS_SANCHEZ%20CONTADOR_URIA_MIGUEL.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Santos, A. (2003). *Introdução de Nitrogênio em Ligas Sinterizadas de Fe-Cr, Submetidas a uma Descarga Luminescente Anormal* [Tesis de Doctorado, Universidade Federal de Santa Catarina]. Repositório Institucional da UFSC. <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/85562/195715.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Serrano, A. (2018). *Combustión de combustibles líquidos con captura de CO₂ mediante transportadores sólidos de oxígeno* [Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza]. Digital.CSIC. https://digital.csic.es/bitstream/10261/173290/1/181212Tesis%20Anabel%20Serrano_con%20portada.pdf
- Sreedhar, I., Varun, Y., Singh, S., Venugopalb, A., & Reddyb, B. (2019). Developmental trends in CO₂ methanation using various catalysts. *Catalysis, Science & Technology*, (9), 4478-4504. <https://doi.org/10.1039/C9CY01234F>
- Su, C., Duan, L., Donat, F., & Anthony, E. (2018). From waste to high value utilization of spent bleaching clay in synthesizing high-performance calcium-based sorbent for CO₂ capture. *Applied Energy*, 210, 117-126. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.104>
- Supelano, I., Sarmiento, A., & Soto, E. (2017). Aplicación de la descarga luminiscente anormal como una fuente calórica. *Ciencia en Desarrollo*, 8(2), 25-29. <https://doi.org/10.19053/01217488.v8.n2.2017.5250>
- Thema, M., Bauer, F., & Sterner, M. (2019). Power-to-Gas: Electrolysis and methanation status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 775-787. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.030>
- Tian, S., Jiang, J., Yan, F., Li, K., Chena, X., & Manovic, V. (2016). Highly efficient CO₂ capture with simultaneous iron and CaO recycling for the iron and steel industry. *Green Chemistry*, 18(14), 4022-4031. <https://doi.org/10.1039/C6GC00400h>
- Turrado, S. (2019). *Desarrollo de nuevos procesos de captura de CO₂ con CaO en cementeras* [Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo]. Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo. https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/54064/TD_SandraTurrado.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Vega, R. (2016). *Captura de CO₂ en la combustión de carbón con transportadores sólidos de oxígeno*. Universidad de Zaragoza.
- Wang, M., Rahimi, M., Kumar, A., Hariharan, S., Choi, W., & Hatton, T. (2019). Flue gas CO₂ capture via electrochemically mediated amine regeneration: System design and performance. *Applied Energy*, 255. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113879>.
- Xie, H., Jiang, W., Liu, T., Wu, Y., Wang, Y., Chen, B., Niu, D., & Liang, B. (2020). Low-Energy Electrochemical Carbon Dioxide Capture Based. *Cell Reports Physical Science*, 1(5), 100046. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100046>.
- Zhu, S., Li, J., Toth, A., & Landskron, K. (2019). Relationships between the Elemental Composition of Electrolytes and the Supercapacitive Swing Adsorption of CO₂. *ACS Applied Energy Materials*, 2(10), 7449-7456. <https://doi.org/10.1021/acsaem.9b01435>
- Zimmermann, A., & Schomäcker, R. (2017). Assessing Early-Stage CO₂ utilization Technologies—Comparing Apples and Oranges? *Energy Technology*, (5), 850-860. <https://doi.org/10.1002/ente.201600805>