

Captura, almacenamiento y conversión de CO₂: nuevas técnicas de reducción Capture, storage, and conversion of CO₂: new reduction techniques

A. F. Ochoa-Garfias ^a, R. Trejo-Bautista ^a, D. O. González-Abrego ^{b,*}, E. G. Rojo-Gómez ^{b,*}

^a Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.
^b Dirección de Laboratorios, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

El dióxido de carbono (CO₂) es conocido por ser el principal gas de efecto invernadero (GEI). Los principales factores que han generado el aumento excesivo de emisiones de CO₂ son la combustión del carbón y derivados del petróleo, los automóviles y las instalaciones industriales. A raíz de los efectos del calentamiento global, la comunidad científica comenzó una búsqueda de estrategias para frenar las emisiones de este gas y mitigar los efectos en el medio ambiente. Actualmente existen procesos de captura, almacenamiento y conversión de CO₂, con la finalidad de generar productos útiles para la industria.

Palabras Clave: Dióxido de carbono, medio ambiente, captura, almacenamiento, conversión.

Abstract

Carbon dioxide (CO₂) is known to be the main greenhouse gas (GHG). The main factors that have generated the excessive increase in CO₂ emissions are the combustion of coal and petroleum products, cars, and industrial facilities. Following the effects of global warming, the scientific community began a search for strategies to curb the emissions of this gas and mitigate the effects on the environment. Currently there are processes for the capture, storage and conversion of CO₂, in order to generate useful products for the industry.

Keywords: Carbon dioxide, environment, capture, storage, conversion.

1. Introducción

El dióxido de carbono (CO₂) es un compuesto inorgánico constituido por moléculas triatómicas, las cuales están conformadas por un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno, con un arreglo espacial con geometría lineal (figura 1). La obtención de CO₂ se logra principalmente a partir de la combustión de hidrocarburos alifáticos que son compuestos que contienen únicamente carbono e hidrógeno, que en presencia de calor reaccionan con el oxígeno molecular presente en el aire, provocando la oxidación del compuesto y obteniendo dióxido de carbono gaseoso y vapor de agua como se muestra en la figura 1 (Medina Valtierra, 2010).

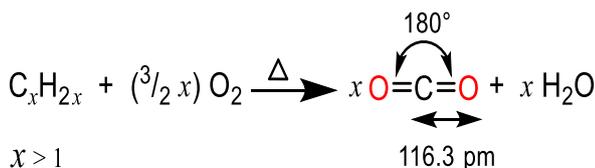


Figura 1: Síntesis del dióxido de carbono.

1.1. Propiedades Físicas y Químicas del CO₂

El dióxido de carbono es un gas incoloro con peso molecular de 44.01 g/mol, sus propiedades físicas se resumen en la tabla 1. Es considerado un gas inerte debido a su baja reactividad a pesar de que estudios demuestran que puede ser considerado como un electrófilo fuerte (especie química que tiende a aceptar un par de electrones para formar un enlace químico), sin embargo, no es posible hacerlo reaccionar con una gran variedad de nucleófilos (especie química que tiene un par de electrones no compartidos y los dona para formar un enlace químico) ya que dichos procesos se encuentran desfavorecidos termodinámicamente (Li, Mayer, Ofial, & Mayr, 2020). Debido a lo anterior, la reactividad del CO₂ es favorecida solo frente a compuestos con gran capacidad electrodonadora como los carbenos *N*-heterocíclicos [N-1] que son un tipo de carbeno que contiene un heterociclo de nitrógeno en su estructura y se utilizan comúnmente como ligantes debido a su capacidad para estabilizar complejos metálicos.

Además, el CO₂ es soluble en agua en cantidades limitadas y forma ácido carbónico (H₂CO₃), que es un ácido débil que

*Autor para la correspondencia: daniel_gonzalez@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: oc420551@uaeh.edu.mx (A. F. Ochoa-Garfias), tr419326@uaeh.edu.mx (R. Trejo-Bautista), erik_rojo@uaeh.edu.mx (E. G. Rojo-Gómez), daniel_gonzalez@uaeh.edu.mx (D. O. González-Ábrego).

incremento de temperatura reciente, el otro se refiere al mecanismo que lo causa (Caballero, Lozano, & Ortega, 2007).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) fue aprobada en 1992 entrando en vigor en marzo de 1994, el objetivo principal era establecer un sistema que ayudara a estabilizar las concentraciones de GEI en la atmósfera a corto plazo (Ramos Martín, 2001). En su momento, también se contemplaba la participación del Acuerdo de París, que tenía como objetivo evitar el aumento de la temperatura media global mayor a 2 °C (Yang *et al.*, 2018). Por otra parte, el Protocolo de Kioto (PK) implementa diversas medidas como limitación y reducción, para disminuir el impacto que tienen las emisiones de gases de efecto invernadero en los países industrializados; dicho Protocolo se firmó el 11 de diciembre de 1997, fue ratificado por 142 países, y entró en vigor desde febrero de 2005 (Fronti de García & Fernández Cuesta, 2007; Díaz Bautista, 2008).

La opinión científica sobre el cambio climático indica que la mayor parte del calentamiento observado en los últimos 100 años es atribuible a la actividad humana (Benavides Ballesteros & León Aristizabal, 2007) y las emisiones de CO₂ han tenido un considerable aumento debido al uso excesivo de combustibles fósiles. Como consecuencia de ello se tienen cambios bruscos en la temperatura del planeta, que a su vez afecta las condiciones que favorecen la existencia de los seres vivos (Benavides Ballesteros & León Aristizabal, 2007; Comisión Europea. Dirección General de Medio Ambiente, 2006). Actualmente las actividades normales del hombre producen alrededor de 6,500 millones de toneladas de CO₂ por año, con un crecimiento del 3% anual, así mismo la notable disminución de áreas verdes sobre la Tierra, tiene como resultado catastrófico la producción del doble de CO₂ de lo que puede absorber la biósfera de manera natural (Caballero, Lozano, & Ortega, 2007).

A pesar de los esfuerzos de distintas organizaciones mundiales de realizar tratados de protección del medio ambiente, reducir las emisiones de CO₂ y establecer su equilibrio representa un gran reto de carácter científico, de manera que se han desarrollado diversas investigaciones y procesos que permitan aprovechar este gas en diferentes áreas, para así solucionar esta problemática que hoy en día se enfrenta.

4. Estrategias de captura y almacenamiento de CO₂

Son técnicas que implican separar el compuesto de otros gases que se obtienen de procesos industriales y energéticos, transportarlo al lugar donde será almacenado y aislarlo por un tiempo prolongado, como se ilustra en la figura 4. Este tipo de tecnología desempeña un papel importante en la lucha contra el cambio climático y reducir las emisiones de este gas. Hoy por hoy, las técnicas más desarrolladas para la captura de CO₂ son tres: pre-combustión, post-combustión y oxicomcombustión (Gayán Sanz & Pérez Vega, 2019).

4.1. Pre-combustión

Se consigue antes de la ignición del combustible fósil y es necesario someterlo a una etapa de oxidación parcial. El proceso comienza cuando se obtiene el gas de síntesis formado por CO e hidrógeno, una vez que se eliminan las partículas secundarias que pueda contener el monóxido de carbono se transforma a CO₂ al entrar en contacto con vapor de agua (reacción Water-Gas Shift). Como resultado se obtiene una mezcla de hidrógeno molecular y dióxido de carbono, la mezcla de gases se purifica, se separa y el CO₂ se comprime para facilitar su almacenamiento, además, el H₂ puede ser aprovechado de diferentes formas, tanto en la combustión en turbinas de gas para la producción de energía

eléctrica, como para su uso en el transporte por medio de celdas de combustible y/o motores de combustión interna (Gayán Sanz & Pérez Vega, 2019).

4.2. Post-combustión

Con esta técnica se consigue separar el CO₂ tras la ignición del combustible fósil con el aire. Este proceso se lleva cabo por técnicas de adsorción, uso de membranas, separación criogénica, sin embargo, la técnica más utilizada es la absorción química, que consiste en hacer pasar la corriente de gas producida por la combustión a través de una torre que contiene un absorbente líquido que retiene únicamente el dióxido de carbono (González Santaló, 2010; Bartolomé Muñoz, Mora Peris, & Recalde Rodríguez, 2011). La técnica se basa en aprovechar las propiedades ácidas del dióxido de carbono neutralizarlo con disoluciones acuosas básicas, que contiene principalmente aminas (Romeo & Bolea, 2015). Finalmente, el gas es separado del absorbente para su posterior transporte y almacenamiento. Una desventaja a la que se enfrenta este proceso son los altos costos energéticos que involucra la separación del gas y el disolvente (Saldívar-Esparza, Cabrera-Robles, & Reta-Hernández, 2017).

4.3. Oxicomcombustión

En este proceso, en lugar de usar aire se utiliza oxígeno puro para quemar el combustible y como resultado de la combustión, se obtiene un gas mixto compuesto esencialmente por vapor de agua y de CO₂, que son más fáciles de capturar y almacenar que los gases de combustión producidos por la combustión convencional. El vapor de agua puede separarse fácilmente del CO₂ mediante el enfriamiento y la compresión del flujo de gas (Saldívar-Esparza, Cabrera-Robles, & Reta-Hernández, 2017; González Santaló, 2010; Bartolomé Muñoz, Mora Peris, & Recalde Rodríguez, 2011). Esta es la tecnología menos desarrollada y posiblemente una de las más atractivas a pesar de los desafíos técnicos y económicos, como el costo del oxígeno puro, que es significativamente más alto que el costo del aire (Gayán Sanz & Pérez Vega, 2019).

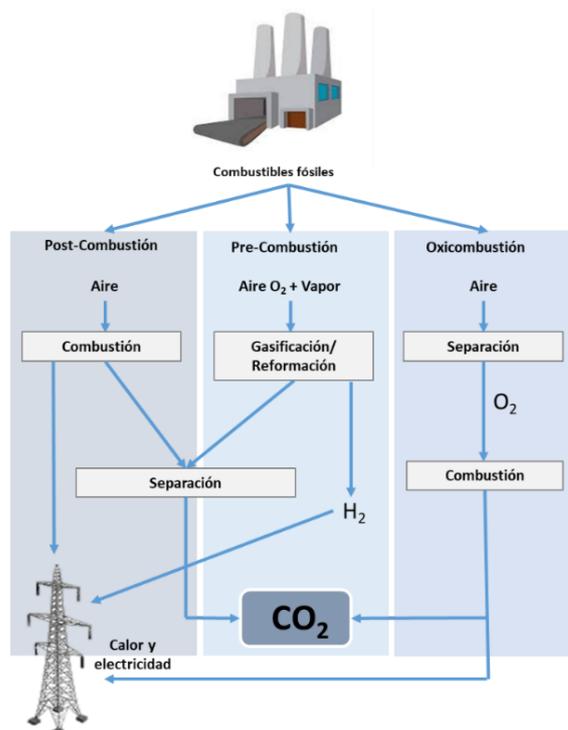


Figura 4: Captura y almacenamiento de CO₂.

4.4. Tecnologías emergentes

Los procesos anteriores son utilizados en escala industrial. Sin embargo, con el objetivo de aumentar la eficiencia de captura y reducir los costes económicos de operación, se han generado tecnologías emergentes que compiten con los métodos estándar.

Dentro de estas nuevas tecnologías se pueden nombrar los sistemas de ciclos sólidos, que son procesos que se efectúan a alta temperatura a partir de dióxido de carbono y óxido de calcio, permitiendo la separación del gas y una integración térmica. La implementación de adsorbentes sólidos como zeolitas, carbón activado o alúmina retienen el CO₂ y eventualmente el sólido es tratado para su posterior recuperación. El uso de membranas se ha implementado en procesos de pre y post-combustión y su objetivo es separar el CO₂ de otros gases como el gas natural y la producción de N₂ puro a partir de aire (Alarcón Rodríguez, 2017).

Por otro lado, la recuperación mejorada del petróleo se considera una tecnología clave de la recuperación de CO₂ debido a su gran aplicación y efectividad. Esta técnica usa el dióxido de carbono capturado para inyectarlo en yacimientos petroleros en condiciones de alta presión, donde la mezcla resultante se mueve fácilmente dando lugar a un incremento en la producción de petróleo (Saldívar-Esparza, Cabrera-Robles, & Reta-Hernández, 2017).

4.5. Transporte

Cuando el CO₂ es capturado debe ser transportado desde los puntos de captura hasta los lugares de almacenamiento designados. Este proceso puede llevarse a cabo por medio de camiones cisterna, buques o tuberías, y se elige un método de transporte dependiendo de la distancia a recorrer hasta el sitio de almacenamiento.

El método clásico mayormente implementado es el bombeo del dióxido de carbono puro por tuberías o gaseoductos. Al controlar la presión de bombeo en aproximadamente 8 MPa, puede aumentarse el flujo del gas haciendo el proceso más fácil y menos costoso que el transporte terrestre, pero si se presentaran impurezas gaseosas durante el proceso, las tuberías tendrían que cambiar su diseño de funcionamiento y esto ocasionaría mayores costos de transporte. Sin embargo, al enviarse a lugares en donde las tuberías ni el transporte terrestre llegan, el transporte por barco es la opción más barata (Saldívar-Esparza, Cabrera-Robles, & Reta-Hernández, 2017).

4.6. Almacenamiento

Un requisito crítico para el almacenamiento del CO₂ es que este debe encontrarse de forma permanente y segura en una zona geológica seleccionada, como por ejemplo, en acuíferos salinos donde se estima una retención de por lo menos algunos cientos de años (Saldívar-Esparza, Cabrera-Robles, & Reta-Hernández, 2017).

En los repositorios por inyección de CO₂ se sugiere que el proceso se lleve a cabo muy por debajo de los mantos acuíferos para su protección. Debido a que son utilizados en la agricultura o actividades humanas, se sugiere que la profundidad sea de más de 1,000 metros, garantizando de igual manera que el CO₂ permanezca en estado supercrítico, es decir, que se mantenga a altas presiones y temperaturas (González Santaló, 2010).

En la actualidad se contemplan tres tipos de repositorios por inyección de CO₂: yacimientos de crudo, yacimientos de gas agotados y acuíferos salinos profundos. Los dos primeros repositorios son la mejor opción debido a la longevidad de uso, mientras que el tercer repositorio se considera una gran elección por la enorme superficie que alberga y la presencia de ellos en gran parte del planeta (Gayán Sanz & Pérez Vega, 2019).

Otro lugar que puede servir como repositorio de este gas son las minas de carbón que no son funcionales para la minería, ya que el carbón poroso del que están formadas sirve para atrapar el dióxido de carbono. Estas minas regularmente contienen metano de forma natural que puede ser aprovechado como fuente de energía cuando este se libera al inyectar el dióxido de carbono (Murugan *et al.*, 2020).

4.7. Costos

Los costos para transportar el CO₂ en gasoductos en tierra y en mar muestran estimaciones variables, pues dependen de diversos factores, como el tipo de terreno que están atravesando y el uso de suelo; de tal modo que los costos de las tuberías en terreno difícil son mucho mayores (Saldívar-Esparza, Cabrera-Robles, & Reta-Hernández, 2017).

El almacenamiento geológico tiene precios muy variables debido a la heterogeneidad de los depósitos en donde se podría almacenar el dióxido de carbono. Los costos dependen del tipo de depósito (por ejemplo, en tierra vs. mar abierto, campo agotado vs formación salina profunda) y yacimiento geológico (por ejemplo, porosidad, permeabilidad, profundidad) (Saldívar-Esparza, Cabrera-Robles, & Reta-Hernández, 2017).

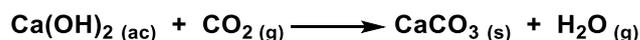
5. Estrategias de conversión

Como se ha mostrado las tecnologías de captura transporte y almacenamiento de dióxido de carbono son muy utilizadas y representan una buena opción para contra restar la sobre producción del gas; pero recientemente se han dirigido los esfuerzos en la búsqueda de metodologías que además de evitar que el CO₂ se libere a la atmósfera permitan que el gas sea transformado y aprovechado de distintas formas. En seguida se describen algunos métodos de conversión del dióxido de carbono.

5.1. Carbonatación mineral

Uno de los métodos que se han propuesto para reducir la problemática ambiental que representa el CO₂, es el proceso de carbonatación mineral directa. El cual consiste en almacenar CO₂ con minerales o desechos alcalinos de calcio (Ca) y magnesio (Mg) principalmente, como CaO, MgO, Ca(OH)₂, Mg(OH)₂, entre otros, lo que provoca una reacción química que permite obtener como productos carbonatos, que pueden ser aprovechados como material de construcción en el campo de la ingeniería civil (Baciocchi *et al.*, 2006; Tian & Jiang, 2012).

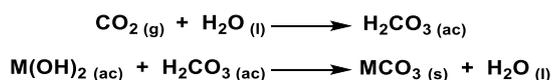
En la carbonatación mineral directa, se pueden distinguir dos tipos de proceso, la carbonatación directa gas-sólido y la carbonatación acuosa, que dependen de la naturaleza del dióxido de carbono a la hora de formarse los carbonatos. En el primer proceso, el CO₂ en estado gaseoso reacciona de forma directa con el óxido o hidróxido alcalino en condiciones de presión y temperaturas altas. Por ejemplo, en el esquema 1 se muestra la síntesis de carbonato de calcio a partir del correspondiente hidróxido en presencia de CO₂ (Tian & Jiang, 2012).



Esquema 1: Reacción de la carbonatación de calcio.

El segundo proceso consiste en disolver el dióxido de carbono en agua, lo que permite la formación de ácido carbónico y que a su vez este reaccione con el hidróxido de calcio o de magnesio en una suspensión acuosa. Como productos se obtienen los

correspondientes carbonatos. En el esquema 2 se ilustra el proceso antes descrito (Tian & Jiang, 2012).



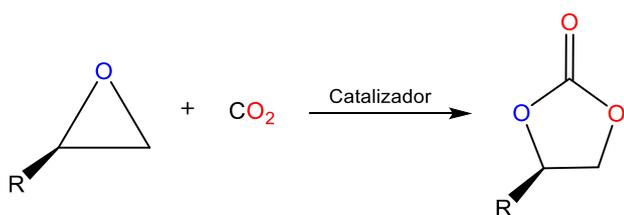
Esquema 2: Reacción del proceso de carbonatación acuosa, M= Ca, Mg.

5.2. Cicloadición del CO₂

La cicloadición del CO₂ a epóxidos (compuestos orgánicos cíclicos formados por dos átomos de carbono y un átomo de oxígeno) permite sintetizar carbonatos cíclicos que son compuestos inodoros, incoloros y biodegradables. Los epóxidos se utilizan en la industria como disolventes polares apróticos en procesos de síntesis y catálisis, como electrolitos en la elaboración de baterías y como monómeros en la síntesis de polímeros (Bahadori *et al.*, 2020). Por otra parte, los carbonatos cíclicos son intermediarios en el sector biomédico y farmacéutico y juegan un papel clave en la síntesis de herbicidas y desinfectantes (Appaturi *et al.*, 2021). Se pueden producir por diferentes rutas que, directa o indirectamente, utilizan dióxido de carbono y generan productos químicos útiles (Lopes, Ribeiro & Martins, 2020). Existen diversas rutas de síntesis industrial de carbonatos a partir de CO₂, entre las cuales destaca la producción directa a partir de metanol y epóxidos y la producción a partir de ortoéster o acetales (Vieira *et al.*, 2017; Rafiee, Khalilpour, & Milani, 2018).

Los líquidos iónicos (IL) son sales que a temperatura ambiente se encuentran en estado líquido y cuya temperatura de fusión está por debajo de los 100 °C. El uso de IL permite seleccionar los iones adecuados para ajustar sus propiedades de acuerdo con los requerimientos de los distintos procesos de síntesis. En la cicloadición se han utilizado como solventes debido a que tienen la capacidad de estabilizar los intermediarios de reacción, así como mejorar la eficiencia de la recuperación del catalizador (Gimeno, Mayoral, & Andrés, 2013).

El proceso de cicloadición de CO₂ con diferentes epóxidos produce carbonatos cíclicos mediante el uso de un catalizador como se ilustra en el esquema 3 (Zhan *et al.*, 2019).



Esquema 3: Proceso de cicloadición de CO₂ con epóxidos.

La síntesis de carbonatos cíclicos a partir de CO₂ se explora ampliamente para procesos industriales. En el proceso Shell Omega, el carbonato de etileno se forma de la cicloadición de CO₂ a óxido de etileno y posteriormente se hidroliza para producir etilenglicol. En el proceso Asahi-Kasei, el carbonato de etileno se fragmenta con metanol para producir carbonato de dimetilo y etilenglicol, lo que proporciona productos comerciales útiles.

Recientemente, se produjeron carbonatos cíclicos utilizando lana en polvo, es decir, partículas finas producidas de fibras de lana natural, que actúa como catalizador para el acoplamiento de cicloadición de dióxido de carbono a epóxidos terminales monosustituidos, como el óxido de propileno, para producir el carbonato cíclicoropilenocarbonato en condiciones libres de disolventes.

La reacción de un diol (HO–R–OH) con dióxido de carbono no se ve favorecida ni termodinámica ni cinéticamente debido a la formación de agua como subproducto. Los intentos de superar este problema incluyen la implementación de un sistema catalítico adecuado y un agente deshidratante (Lopes, Ribeiro & Martins, 2020).

Los MOF (Metal-Organic Frameworks) que son estructuras cristalinas formadas por la unión de moléculas orgánicas a través de átomos metálicos, han generado un interés especial en la investigación, pues la mayoría de los reportes para la cicloadición de CO₂ contienen principalmente centros metálicos y requieren un cocatalizador nucleofílico adicional. El uso de catalizadores basado en MOF transforma el CO₂ a carbonatos cíclicos y de acuerdo con la literatura se puede clasificar en tres categorías.

- MOF bifuncionales con enlazadores neutros que contienen el sitio básico de Lewis: Son MOF constituidos por conectores orgánicos que contienen la funcionalidad básica de Lewis, como –NH₂, –OH, –NH, –S=O–.
- MOF con conectores iónicos funcionalizados por modificación post-sintética (PSM): Estos MOF contienen iones halógenos libres nucleofílicos, que facilitan la apertura del anillo del epóxido y conduce a la transformación eficiente de CO₂ a carbonatos cíclicos.
- MOF encapsulados con complejos iónicos que contienen aniones nucleofílicos: Se realizan por medio de la encapsulación de iones de haluro que contienen complejos iónicos en un marco poroso (Pan & Heagy, 2020).

Los catalizadores basados en porfirinas (heterociclos formados por cuatro anillos pirrólicos unidos por puentes metálicos) son muy prometedores (figura 5). Gracias a la actividad catalítica de estas especies en la conversión de CO₂ en carbonatos cíclicos y oxazolidinonas, puede combinarse su capacidad para capturar CO₂ de manera eficiente cuando se disponen en MOF y marcos orgánicos covalentes (COF) (Intrieri *et al.*, 2019).

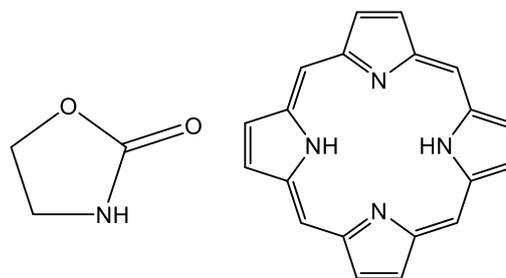


Figura 5: Estructura de oxazolidinona (izquierda) y porfirina (derecha).

5.3. Metanización del CO₂

La metanización es un proceso que consiste en la conversión de dióxido de carbono (CO₂) a metano (CH₄). La conversión de CO₂ en productos químicos útiles como el CH₄ ha atraído gran atención para su uso en apoyo de la captura y utilización del carbono. El metano es un combustible que tiene grandes aplicaciones. Por ejemplo, es usado para la generación de energía eléctrica, como un biocombustible en el transporte y se emplea como un gas para la calefacción y cocina en los hogares. Además, también es de gran importancia en la industria química, ya que es la materia prima para la generación de hidrógeno, metanol y ácido acético.

El proceso para convertir el CO₂ en CH₄, implica hacer reaccionar al hidrógeno con dióxido de carbono a temperaturas de 300 a 400 °C utilizando un catalizador basado en diferentes metales de transición como Ni, Co, Fe y Mo. El catalizador, requiere de energía solar para romper las moléculas de CO₂,

obteniendo así átomos de carbono y oxígeno que luego se combinan con hidrógeno para formar metano y agua (Mohd Esa & Sapawe, 2020).

5.4. Hidrogenación de dióxido de carbono

La hidrogenación del CO_2 permite la obtención de ácido fórmico y es necesario el uso de complejos de metales de transición como catalizadores (figura 6). Este proceso ha tenido bastante atención debido a las propiedades útiles del ácido fórmico en la industria química y farmacéutica.

El catalizador transforma el CO_2 y en presencia de una base soluble se lleva a cabo la formación del formiato, que a su vez se transforma en el ácido fórmico por la interacción con los respectivos iones de la base soluble. (Makuve, Mehlana, Tia, Darkwa, & Makhubela, 2019).

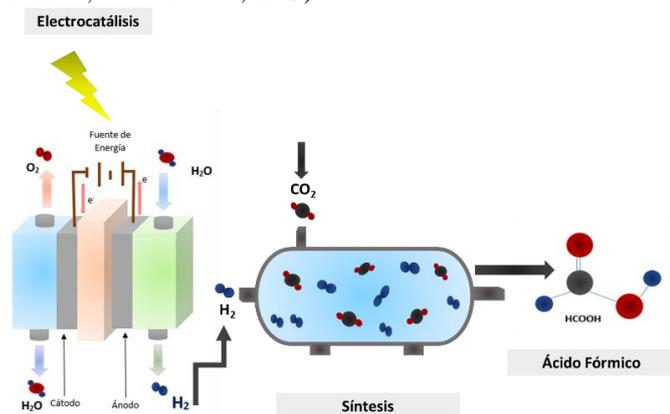


Figura 6: Proceso de hidrogenación del CO_2 .

5.5. Reducción fotocatalítica

Otra alternativa que los científicos han ideado para disminuir las emisiones de CO_2 al medio ambiente es la reducción fotocatalítica, siendo esta una reacción fotoquímica que convierte la luz solar en energía química en la superficie de un catalizador (Benavides Ballesteros & León Aristizabal, 2007). La fotocatalisis sigue tres etapas clave, las cuales son la absorción de fotones por semiconductor, la separación de carga y las reacciones de superficie (Pan & Heagy, 2020).

Uno de estos métodos es el uso de nanopartículas de $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2$, ya que es un proceso que se realiza a temperatura ambiente, con costes económicos bajos y el compuesto produce una reacción similar a la fotosíntesis (Low, Zhang, Tong, Shen, & Yu, 2018). El proceso se da cuando el fotocatalizador está en contacto con luz solar y agua, produciendo e^- (electrones) y h^+ (huecos) excitados que se mueven hacia la superficie y se recombinan con el CO_2 dando como producto metano. Este proceso se ilustra en la figura 7 (Manzoor, Sadiq, Naqvi, Sikandar, & Naqvi, 2020).

Los MOF también se han estudiado en la reducción fotocatalítica del CO_2 , donde se observa que este proceso es eficiente debido a su adaptabilidad y mayor área superficial de reacción, comparado con otro tipo de catalizadores inorgánicos. Se describe que los MOF tienen la capacidad de liberar electrones al interactuar con la luz solar, las partículas fotogeneradas son aceptadas por moléculas de dióxido de carbono y forman un radical libre, lo que lleva a la conversión de CO_2 en CO por un proceso de transporte de dos electrones asistido por protones (Wang et al., 2019).

Por otra parte, el fósforo negro (BP) es uno de los materiales más atractivos para la reducción fotocatalítica de CO_2 , puede formar monocapas funcionalizadas con hidroxilos (M-BP-OH), tiene un alto potencial de reducción, alta estabilidad, estructura

electrónica única, alto rendimiento y un bajo costo. El proceso se genera en las monocapas al entrar al contacto con la luz solar produciendo e^- , los cuales se inyectan en la molécula de CO_2 formando una especie intermediaria $-\text{COOH}$ (grupo carboxilo) y durante la reducción fotocatalítica la conversión completa a CO (Zhu et al., 2020).

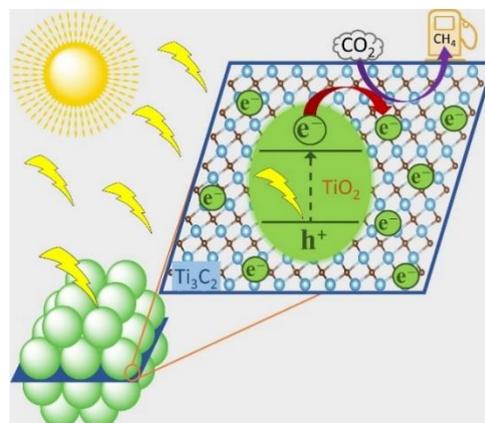


Figura 7: Reducción fotocatalítica de CO_2 por medio del compuesto $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2$.

5.6. Reducción electroquímica

Este método consiste en la reducción del CO_2 , mediante un proceso catalítico empleando un electrocatalizador que está conformado por dos electrodos, cátodo y ánodo sobre los cuales se aplica un voltaje determinado. Los productos que se pueden obtener mediante este proceso son diversos, como puede ser el monóxido de carbono (CO), ácido fórmico (HCOOH), formaldehído (CH_2O), metanol (CH_3OH), metano (CH_4), etileno (C_2H_4) y etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) (Lin, Guo, Li, Patel, & Seifitokaldani, 2020).

Las nanoestructuras de oro de alta densidad representan otra opción electrocatalítica para lograr la conversión de CO_2 a CO y que sirva como medio para almacenar energía renovable. El proceso se da en las puntas afiladas de las nanoestructuras, concentrando las moléculas de CO_2 cerca de la superficie activa del catalizador, produciendo energía de alrededor de 38 mA y una conversión a CO como se muestra en la figura 8 (Safaei et al., 2016).

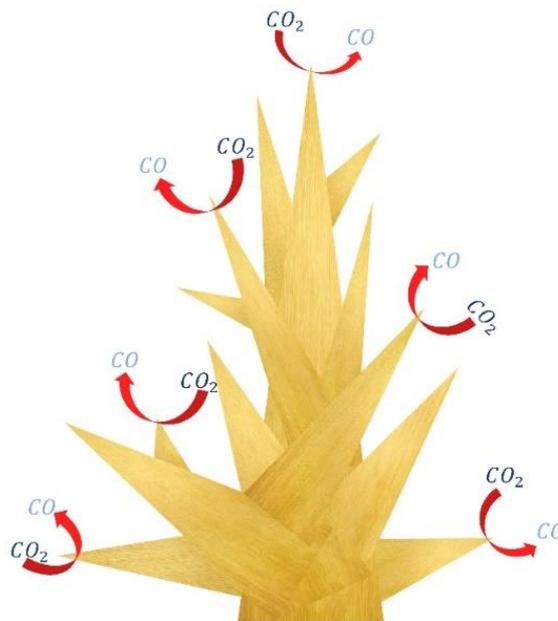


Figura 8: Electrorreducción del CO_2 en estructuras *nanosharp*.

6. Conclusiones

El dióxido de carbono es uno de los gases de efecto invernadero con mayor número de emisiones, esto nos asegura que el calentamiento global es un fenómeno que se seguirá produciendo durante mucho tiempo tanto de forma natural como antropogénica, por lo que es necesario seguir trabajando en el desarrollo de nuevas estrategias para reducir las emisiones de CO₂.

De igual forma la comunidad científica ha propuesto métodos de captura y almacenamiento con resultados prometedores, pero hasta el momento no se han podido llevar a cabo a escalas mayores, por lo que es indispensable continuar las investigaciones hasta lograr un desarrollo completo de los procesos. Del mismo modo, han sido planteadas rutas de síntesis para la conversión de CO₂ en productos útiles para la industria, esto es posible debido a que este gas tiene distintas aplicaciones que van desde el campo alimenticio hasta el campo industrial.

La reducción de los costos energéticos y económicos de estas tecnologías es de suma importancia para incrementar el rendimiento y de esta forma bajar la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera para no agravar los problemas ambientales actuales.

Agradecimientos

A la estudiante Daniela Vargas Ávila por su contribución en la elaboración de figuras. A la UAEH por brindar un espacio adecuado para realizar los estudios de licenciatura de AFOG y RTB.

Referencias

- Alarcón Rodríguez, J. M. (2017). Desarrollo de nuevos procesos de combustión con captura de CO₂ empleando óxidos metálicos. Programa de Doctorado en Ingeniería Energética, 176. Obtenido de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=207326>
- Appaturi, J. N., Rajabathar, J. R., & Gnanamani, M. K. (2021). Review on Carbon Dioxide Utilization for Cycloaddition of Epoxides by Ionic Liquid-Modified Hybrid Catalysts: Effect of Influential Parameters and Mechanisms Insight. *Catalysts*, 11(4), 16. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal11010004>
- Bacocchi, R., Poletini, A., Pomi, R., Prigiobbe, V., Nikulshina Von Zedwitz, V., & Steinfeld, A. (2006). CO₂ Sequestration by Direct Gas-Solid Carbonation of Air Pollution Control (APC) Residues. *Energy & Fuels*, 20(5), 1933–1940. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef060135b>
- Bahadori, M., Marandi, A., Tangestaninejad, S., Moghadam, M., Mirkhani, V., & Mohammadpoor-Baltork, I. (2020). Ionic Liquid-Decorated MIL-101(Cr) via Covalent and Coordination Bonds for Efficient Solvent-Free CO₂ Conversion and CO₂ Capture at Low Pressure. *The Journal of Physical Chemistry*, 124(16), 8716–8725. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b11668>
- Bartolomé Muñoz, C., Mora Peris, P., & Recalde Rodríguez, J. D. (2011). Estado del arte de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ en la industria del cemento. (A. d. España, Ed.) Estado del Arte. Agrupación de fabricantes de cemento de España, 102. Obtenido de: <https://www.oficemen.com/wp-content/uploads/2017/05/EstadodelArteWeb.pdf>
- Benavides Ballesteros, H. O., & León Aristizabal, G. E. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. (S. d. Meteorología, Ed.) Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Obtenido de: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>
- Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista Digital Universitaria*, 8(10), 12. Obtenido de: <http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/int78.htm>
- Comisión Europea. Dirección General de Medio Ambiente. (2006). El cambio climático: ¿qué es? Introducción para jóvenes. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas. Obtenido de: <http://rcc.marn.gov.sv/xmlui/handle/123456789/102>
- Díaz Bautista, A. (2008). Un Análisis Económico Político para México del Protocolo de Kyoto. *DELOS: Revista Desarrollo Local Sostenible*, 1(1), 20. Obtenido de: <https://www.eumed.net/rev/delos/01/>
- Fronti de García, L., & Fernández Cuesta, C. (2007). El protocolo de Kioto y los costos ambientales. *Revista Digital del Instituto Internacional de Costos*(1), 9-31. Obtenido de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3362188>
- Gayán Sanz, P., & Pérez Vega, R. (2019). Tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂: Chemical Looping Combustion. *Revista del Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Minas de Aragón*(29), 35-39. Obtenido de: <http://hdl.handle.net/10261/205951>
- Gimeno, M., Mayoral, M., & Andrés, J. (2013). Los líquidos iónicos como una alternativa a la captura de CO₂ en post-combustión. *Boletín del Grupo Español del Carbón*(30), 2-5. Obtenido de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5074914>
- González Santaló, J. M. (2010). Secuestro y captura de CO₂: Una opción para mitigar el cambio climático. *Boletín IIE: Tendencias tecnológicas*, 139-149. Obtenido de: <https://www.ineel.mx/boletin042010/tenden.pdf>
- Guerrero Santafé, J. E. (2000). IMPACTO AMBIENTAL GENERADO POR LAS ACTIVIDADES QUÍMICAS DE PRODUCCIÓN Y USO DE CLOROFLUOROCARBONOS. *TED: Tecné, Episteme y Didaxis*(7), 10. DOI: <https://doi.org/10.17227/ted.num7-5660>
- Intrieri, D., Damiano, C., Sonzini, P., & Gallo, E. (2019). Porphyrin-based homogeneous catalysts for the CO₂ cycloaddition to epoxides and aziridines. *Journal of Porphyrins and Phthalocyanines*, 23, 24. DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S1088424619300015>
- Li, Z., Mayer, R., Ofial, A., & Mayr, H. (2020). From Carbodiimides to Carbon Dioxide: Quantification of the Electrophilic Reactivities of Heteroallenes. *Journal of the American Chemical Society*, 142(18), 8383–8402. DOI: <https://doi.org/10.1021/jacs.0c01960>
- Lin, R., Guo, J., Li, X., Patel, P., & Seifitokaldani, A. (2020). Electrochemical Reactors for CO₂ Conversion. *Catalysts*, 10(473), 35. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal10050473>
- Linde Group. (2018). Dióxido de carbono (CO₂) Un valioso producto con posibilidades únicas. *Boletín de The Linde Group*, 2. Obtenido de: https://www.linde-gas.es/es/images/Di%C3%B3xido%20de%20carbono%28CO2%29_Un%20valioso%20producto%20con%20posibilidades%20%C3%BAnicas_23808-10_tcm316-116928.pdf
- Linde Group. (2020). Dióxido de carbono. Ficha de datos de seguridad, 15. Obtenido de: https://www.linde-gas.es/es/news_and_media/download/safety_data_sheets/index.html
- Lopes, E. J., Ribeiro, A. P., & Martins, L. M. (2020). New Trends in the Conversion of CO₂ to Cyclic Carbonates. *Catalysts*, 10(479), 14. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/catal10050479>
- Low, J., Zhang, L., Tong, T., Shen, B., & Yu, J. (2018). TiO₂/MXene Ti₃C₂ composite with excellent photocatalytic CO₂ reduction activity. *Journal of Catalysis*, 361, 255–266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2018.03.009>
- Makeve, N., Mehlena, G., Tia, R., Darkwa, J., & Makhubela, B. C. (15 de Agosto de 2019). Hydrogenation of carbon dioxide to formate by α -diimine Ru^{II}, Rh^{III}, Ir^{III} complexes as catalyst precursors. *Journal of Organometallic Chemistry*, 899, 14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2019.120892>
- Manzoor, N., Sadiq, M., Naqvi, M., Sikandar, U., & Naqvi, S. R. (2020). Experimental Study of CO₂ Conversion into Methanol by Synthesized Photocatalyst (ZnFe₂O₄/TiO₂) Using Visible Light as an Energy Source. *Catalysis*, 10(163), 17. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal10020163>
- Medina Valtierra, J. (2010). La Dieta del Dióxido de Carbono (CO₂). *Conciencia Tecnológica*(39), 50-53. Obtenido de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94415753009>
- Mohd Esa, Y. A., & Sapawe, N. (2020). A short review on carbon dioxide (CO₂) methanation process. *Materials Today: Proceedings*, 394-397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.191>
- Murugan, A., Brown, R. J., Wilmot, R., Hussain, D., Bartlett, S., Brewer, P. J., Finlayson, A. J. (2020). Performing Quality Assurance of Carbon Dioxide for Carbon Capture and Storage. *Journal of Carbon Research*, 6(76), 15. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/c6040076>

- Pan, H., & Heagy, M. D. (2020). Photons to Formate—A Review on Photocatalytic Reduction of CO₂ to Formic Acid. *Nanomaterials*, 10(2422), 24. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/nano10122422>
- Rafiee, A., Khalilpour, K. R., & Milani, D. (2018). Chapter 8 - CO₂ Conversion and Utilization Pathways. En K. R. Khalilpour, *Polygeneration with Polystorage for Chemical and Energy Hubs* (págs. 213-245). Australia: Academic Press- Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813306-4.00008-2>
- Ramos Martín, J. (2001). De Kyoto a Marrakech: Historia de una flexibilización anunciada. *Diagnósticos Ambientales 1992-1997-2001*(22), 45-56. Obtenido de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=153469>
- Romeo, L., & Bolea, I. (2015). Captura de CO₂ en procesos postcombustión. *Boletín del Grupo Español del Carbón*, 35, 8-11. Obtenido de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5111515>
- Safaei, T. S., Mepham, A. H., Zheng, X., Pang, Y., Dinh, C.-T., Liu, M., . . . Sargent, E. H. (2016). High-Density Nanosharp Microstructures Enable Efficient CO₂ Electroreduction. *Nano Letters*, 16(11), 7224–7228. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b03615>
- Saldívar-Esparza, S., Cabrera-Robles, J. S., & Reta-Hernández, M. (2017). Tecnologías de captura y almacenamiento de dióxido de carbono. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*, 4(12), 22-34.
- Sistema de Gestión INDURA S.A. (2018). Dióxido de carbono. Hoja de datos de seguridad, 10. Obtenido de: <http://www.indura.cl/content/storage/cl/producto/4512b52cda56483da53741560ffedccd.pdf>
- Tian, S., & Jiang, J. (2012). Sequestration of Flue Gas CO₂ by Direct Gas–Solid Carbonation of Air Pollution Control System Residues. *Environmental Science & Technology*, 46(24), 13545–13551. DOI: <https://doi.org/10.1021/es303713a>
- Vieira, M., Aquino, A., Schütz, M., Vecchia, F., Ligabue, R., Seferin, M., & Einloft, S. (2017). Chemical Conversion of CO₂: Evaluation of Different Ionic Liquids as Catalysts in Dimethyl Carbonate Synthesis. *Energy Procedia*, 114, 7141-7149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1876>
- Wang, X.-K., Liu, J., Zhang, L., Dong, L.-Z., Li, S.-L., Kan, Y.-H., . . . Lan, Y.-Q. (2019). Monometallic Catalytic Models Hosted in Stable Metal–Organic Frameworks for Tunable CO₂ Photoreduction. *ACS Catalysis*, 9(3), 1726–1732. DOI: <https://doi.org/10.1021/acscatal.8b04887>
- Yang, H., Liu, J., Jiang, K., Meng, J., Guan, D., Xu, Y., & Tao, S. (2018). Multi-objective analysis of the co-mitigation of CO₂ and PM_{2.5} pollution by China's iron and steel industry. *Journal of Cleaner Production*, 185, 331-341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.092>
- Zhan, Y., Han, Q., Pan, S., Kan, X., Mi, J., Liu, F., Jiang, L. (2019). Biomass-Derived Hierarchically Porous Carbons Abundantly Decorated with Nitrogen Sites for Efficient CO₂ Catalytic Utilization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(19), 7980–7988. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b00981>