

**Camino a la Sostenibilidad:
Innovadoras Estrategias
para Combatir la Contaminación
por dióxido de carbono CO₂**

Dr. Bertin Anzaldo

*Laboratorio Síntesis de Complejos,
Facultad de Ciencias Químicas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla BUAP*

Dr. Pankaj Sharma

*Instituto de Química,
Universidad Nacional Autónoma de México UNAM*

Dra. Maribel Arroyo-Carranza

*Centro de Química del Instituto de Ciencias,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla BUAP*

Abstract

The transformation of nontoxic carbon dioxide (CO₂) into fuels and valuable chemicals has become an interesting approach to address CO₂ emissions and can help in addressing climate change. A promising solution lies in using solar energy to convert CO₂ into useful materials, which could pave the way for a more sustainable future. Solar energy has the potential to trigger chemical reactions that enable the production of plastics and pharmaceuticals. Researchers are working on different approaches, such as photocatalysis, photoelectrochemical conversion, and microbial photoelectrochemical conversion, to transform CO₂ into valuable chemicals and fuels using solar energy. These methods can reduce the environmental impact of emissions and help address climate change while also providing opportunities for the production of useful materials.

Palabras clave: Energía, Dióxido de carbono, Fotocatalizador, Combustibles.

Keywords: Energy, Carbon dioxide, Photocatalyst, Fuels.

Una Solución Brillante: El Proceso Revolucionario a partir de dióxido de carbono CO₂ para producir diversos Productos Químicos y Combustibles

La vida moderna depende críticamente de un flujo constante de energía, utilizado por la humanidad en forma de combustibles, electricidad y calor. Actualmente, más del 80% de la energía primaria mundial proviene de fuentes fósiles como carbón, petróleo y gas. Estos combustibles, creados a partir de biomasa acumulada durante millones de años, han sido esenciales para las actividades humanas, proporcionando energía, pero también emitiendo dióxido

de carbono (CO₂). Desde el inicio de la era industrial, la humanidad ha utilizado el exceso de luz solar fosilizada acumulada durante millones de años (combustibles fósiles). En consecuencia, el CO₂ que se fijó en forma de carbohidratos mediante la fotosíntesis y se almacenó durante millones de años está regresando a la atmósfera a un ritmo increíblemente alarmante, a través de la quema de los combustibles fósiles (Peter, 2018, p 1557). En las últimas décadas, ha quedado claro que el CO₂ liberado de esta manera ha afectado la estabilidad climática. Las emisiones de dióxido de carbono son un problema que la humanidad debe abordar urgentemente para evitar una catástrofe climática, siendo de las mayores amenazas que enfrenta la sociedad en la actualidad. Considerando que las emisiones globales de CO₂ son alrededor de varios millones de toneladas métricas por año, la conversión de CO₂ en productos químicos útiles podría, con el paso del tiempo, tener un impacto positivo en el problema de estas emisiones. Una de las propuestas para reducir el costo de la captura del CO₂ es venderlo para su uso posterior. Como resultado, el CO₂ ahora se considera también una mercancía, y la tecnología de captura, uso y almacenamiento de carbono (en su forma de CO₂) es conocida con un nuevo acrónimo: CCUS (Carbon Capture, Use and Storage; por sus siglas en inglés).

En relación con el aprovechamiento del dióxido de carbono, el mayor uso actual del CO₂ es para la producción de urea (utilizada principalmente como fertilizante) mediante la reacción de amoníaco (NH₃) con CO₂, seguido de la producción de policarbonatos y carbonatos cíclicos a través de la condensación catalítica de CO₂ con epóxidos, ambos son procesos muy importantes donde son generados nuevos enlaces

C-N y C-O, sin embargo, no implican una *reducción formal* en el sentido químico (disminución del estado de oxidación) del carbono proveniente del CO_2 y por lo tanto no hay un almacenamiento significativo de energía. Por otra parte, se ha dedicado gran esfuerzo a investigar la reducción de CO_2 a ácido fórmico (HCOOH), formaldehído (HCHO) y metanol (CH_3OH) por métodos electroquímicos, fotoelectroquímicos y catalíticos, con perspectiva a futuras economías de precursores no fósiles. Sin embargo, estos productos aún no cubren toda la materia prima necesaria para la síntesis de productos químicos finos o de combustibles de alta energía, en contraste, los petroquímicos (hidrocarburos), son fáciles de transformar en una variedad de productos químicos y poseen alto contenido de energía. Por lo tanto, es necesario desarrollar nuevos métodos de reciclaje de dióxido de carbono que combinen la reducción de CO_2 y la formación de enlaces C-C, C-N y C-O, porque ejemplos de estos últimos son todavía muy escasos.

Existen ya algunas rutas para transformar CO_2 a combustibles y otros productos químicos. Desde la perspectiva general de la recuperación de la inversión energética, los métodos más prometedores son los que emplean energías renovables tales como la solar, la cual es una fuente limpia, abundante y gratuita. Aunque actualmente el contenido de carbono de algunos productos generados a partir de CO_2 representa sólo una muy pequeña fracción del CO_2 emitido, la estrategia de la transformación de CO_2 impulsada por energía solar puede extenderse a la producción de combustibles en el futuro, especialmente para la aviación donde la alta densidad de energía es inevitable, y eso representará una huella de carbono mucho mayor.

En 2018 en Roma se discutieron resultados recientes sobre el uso de la energía solar mediante reacciones fotoquímicas artificiales para cuatro aplicaciones importantes: conversión de energía solar en combustibles, conversión de luz solar en energía eléctrica, uso de energía solar para realizar síntesis orgánicas que no proceden mediante la química convencional, y reacciones fotoquímicas para reducir la contaminación (Balzani, 2019, p 443222).

En los últimos años se han realizado muchos esfuerzos de investigación dedicados a la conversión de CO_2 impulsada por energía solar (*Figura 1*) y varios programas de financiamiento nacionales e internacionales están siendo creados en el mundo para promover la investigación fundamental y el desarrollo de tecnología en este tema, resaltando el programa “SUN-ERGY”, bajo la tutela de *Horizonte Europa*, también en línea con la iniciativa de “Química Impulsada por Energía Solar” de la *Sociedad Química Europea (EuChemS)*. En los Estados Unidos, el “Joint Center for Artificial Photosynthesis” (JCAP) fue establecido en 2010, con el objetivo de encontrar nuevas y efectivas formas de producir combustibles utilizando sólo luz solar, agua y CO_2 (He, 2020, p 1996).

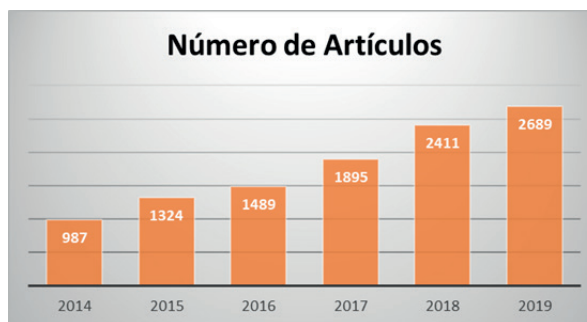


Figura 1. Número de artículos publicados de 2014–2019 dedicados a la conversión de CO_2 impulsada por energía solar. Datos colectados de Web of Science Core Collection (He, 2020, p 1996).

En la exploración de nuevas formas de utilizar el CO₂ para crear productos químicos útiles, en 2012, un grupo de científicos desarrollaron un método eficiente para convertir el CO₂ en formamidas (HCONR₂), que son precursores importantes para fabricar medicamentos, pesticidas y varios disolventes (Gomes, 2012, p 191). En este proceso innovador a partir de aminas (R₂NH) y CO₂, se utilizó como agente reductor un organosilano (R₃SiH), que es barato y no tóxico, junto con un catalizador llamado 1,5,7-Triazabicyclo[4.4.0]dec-5-eno (TBD). Este catalizador facilitó la transformación del CO₂ en las formamidas al promover la inserción del CO₂ en el enlace NH de las aminas. La gran ventaja de este método es que utiliza condiciones de reacción muy suaves, y organosilanos (R₃SiH) en lugar de H₂ como agente reductor, lo que hace más económico el proceso en comparación con el método de formulación de aminas que emplea CO₂ y H₂. Además, este método puede transformar una más amplia variedad de aminas, y no necesita usar disolventes.

Pero reciclar el CO₂ a combustibles y productos químicos valiosos siempre ha requerido demasiada energía para tener un beneficio económico. La emergente alternativa, que involucra el uso de la energía solar en lugar de combustibles fósiles para convertir el exceso de dióxido de carbono en productos esenciales, trabaja en forma dual: reduciendo las emisiones y consumiendo el CO₂ ya existente.

La energía que nos proporciona el sol podría ser la clave para una revolución energética. En solo una hora, el sol nos brinda la misma cantidad de energía que consumimos en un año a través de fuentes como el petróleo, el gas y la energía nuclear (ht-

[tps://energeticafutura.com/blog/cuanta-energia-se-puede-extraer-de-la-radiacion-solar/](https://energeticafutura.com/blog/cuanta-energia-se-puede-extraer-de-la-radiacion-solar/)). A diferencia de otras fuentes de energía, como los combustibles fósiles, el sol tiene una esperanza de vida de más de 9 mil millones de años. Esto significa que, si aprendemos a aprovechar su radiación, tendremos energía disponible durante un tiempo extremadamente prolongado. Este potencial energético enorme nos ofrece la oportunidad de dejar gradualmente atrás las fuentes de energía convencionales y adoptar alternativas limpias y sostenibles.

Plantas, algas y ciertas bacterias, sistemas basados en la energía solar, tienen la sorprendente capacidad de transformar dióxido de carbono y agua en compuestos químicos ricos en carbono, hidrógeno y oxígeno. La fotosíntesis, un proceso biológico esencial, ejemplifica cómo la energía solar se captura y almacena. Desarrollar sistemas artificiales que puedan igualar o superar la eficiencia de estos procesos naturales es un reto crucial para avanzar hacia un manejo de la energía más sostenible. Observando este comportamiento, algunos investigadores emplearon la estrategia de imitar el proceso de fotosíntesis, aprovechando la luz solar. Pero este tipo de reactores a menudo necesitan funcionar a temperaturas alrededor de 1000 °C, demasiado altas para manejarlas a gran escala. Otros químicos desarrollan métodos para realizarlas a temperaturas cercanas a las ambientales mediante el uso de nuevos catalizadores. Los procesos de conversión fotocatalítica y fotoelectroquímica para transformar el CO₂ en productos químicos valiosos son altamente dependientes de la energía necesaria para activar la reacción, en particular, al CO₂ que es termodinámicamente muy estable debido a sus dos fuertes enlaces dobles C=O (con una ener-

gía de enlace de 532.2 ± 0.4 kJ/mol). Como resultado, se requiere una gran cantidad de energía para superar la barrera de activación en la conversión de esta molécula. Esto subraya la extrema importancia de la elección del fotocatalizador en sistemas de este tipo (Yau, 2022, p 16396).

La investigación y desarrollo de la química en la conversión sostenible a través de la energía solar está adquiriendo un impulso significativo, y esto no podría haber llegado en un momento más oportuno. A medida que enfrentamos desafíos ambientales cada vez mayores, como la escasez de recursos, la capacidad de aprovechar la energía solar para impulsar nuestras necesidades químicas se convierte en una prometedora solución para un futuro más limpio y sostenible (*Figura 2*).

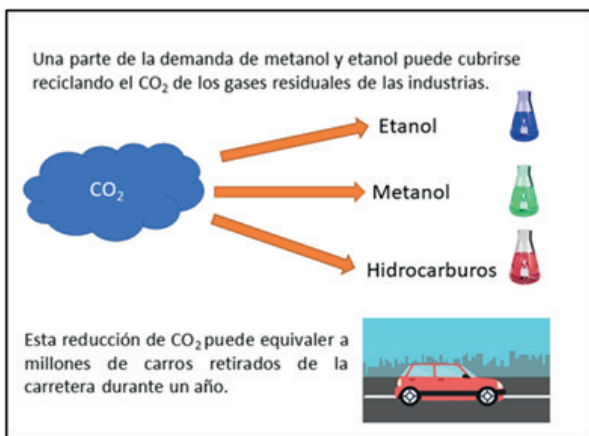


Figura 2. Productos potenciales derivados del reciclaje de CO₂ generado por las industrias.

La luz UV en la conversión de CO₂

La química impulsada por la luz con catalizadores foto-redox abre caminos más sostenibles y eficientes energéticamente para utilizar el CO₂ y convertirlo en precursores y productos útiles. Los catalizadores foto-redox orgánicos usan luz visible o ultravioleta para activarse. Luego, apagan

estos estados utilizando un donador de sacrificio como Et₃N (trietilamina) para generar un anión radical muy reactivo capaz de iniciar la reducción del CO₂ y realizar transformaciones químicas que, de otra manera, serían térmicamente exigentes. En una investigación reciente, se analizó la velocidad de transferencia de electrones para la reducción de CO₂ con catalizadores foto-redox orgánicos, específicamente aniones radicales de oligo(p-fenilenos) sustituidos (OPPs), para evaluar nuevas formas de utilizar el CO₂. Además, la etapa de transferencia electrónica (reducción de CO₂) también sirve para regenerar el OPP (Kron, 2020, p 5359). Mejorar las tasas de transferencia de electrones, aumentando la capacidad donadora de los sustituyentes en el oligofenileno, podría ser una forma de desarrollar mejores catalizadores activos. Sin embargo, los investigadores demostraron que los coeficientes de velocidad disminuyen al hacer esto, ya que otros factores, como la presencia de pares solitarios en el sustituyente, también son importantes y pueden influir en el proceso de manera inesperada. Este fue el primer estudio computacional de su tipo, ya que los investigadores no habían examinado previamente el mecanismo subyacente de cómo se mueve un electrón desde una molécula orgánica como el oligofenileno al CO₂. El equipo descubrió que pueden llevar a cabo modificaciones sistemáticas en el catalizador de oligofenileno, agregando grupos de átomos que otorgan propiedades específicas cuando están unidos a estas moléculas, lo que tiende a empujar los electrones hacia el centro del catalizador, acelerando la reacción.

En 2020 destaca un artículo de revisión acerca de recientes investigaciones de la conversión de CO₂ en combustibles y pro-

ductos químicos de alto valor utilizando la energía solar (He, 2020, p 1996) como una prometedora solución que se puede abordar desde diversos enfoques, como la conversión biofotosintética (BPS), fotosintética (PS), fotocatalítica (PC), fototérmica (PT), fotoelectroquímica microbiana (M-PEC) y la fotovoltaica más electroquímica (PV+EC). Estos métodos eficientes permiten transformar el dióxido de carbono en valiosos combustibles y otros productos químicos, todo gracias al poder del sol. Este enfoque no sólo representa una innovadora manera de aprovechar las fuentes de energía renovable, sino que también involucra la variedad de las técnicas mencionadas, y la estrategia de convertir los residuos en riqueza desempeñará un papel clave en la transformación verde de la industria química. La conversión biofotosintética de CO₂, se inspira en la fotosíntesis, y emplea enzimas redox, como microorganismos o fotocatalizadores artificiales para la fotosíntesis. Un enfoque completamente diferente es la conversión fototérmica de CO₂, que emplea reactores solares de alta temperatura, por radiación solar concentrada, para desdoblarse el CO₂, ofreciendo un potencial de producción significativo. La conversión fotoelectroquímica microbiana del CO₂ aprovecha nanodispositivos semiconductores y biocatalizadores altamente selectivos para generar combustibles y otros productos químicos. La conversión PV+EC combina las celdas fotovoltaicas con la electrólisis de CO₂ en un solo dispositivo. Este enfoque separa las etapas de recolección de luz y la conversión electroquímica. Entre todos estos enfoques, los más estudiados son la fotosíntesis (PS), la fotocatalisis (PC), la fotoelectroquímica (PEC) y la combinación de energía fotovoltaica con procesos electroquímicos (PV+EC), debido a su idonei-

dad para condiciones suaves de presión y temperatura. Un análisis amplio y profundo de estos investigadores, comparando diferentes parámetros (actividad, selectividad y durabilidad), les llevó a concluir que sólo el enfoque PV+EC muestra un comportamiento, especialmente en términos de actividad y durabilidad, que puede conducir a tecnologías industriales en el futuro cercano.

En la transformación del CO₂ en otras sustancias químicas, que involucran metodologías termoquímicas, fotoquímicas y rutas electroquímicas, la elección de los catalizadores y la tecnología de los procesos es crítica y varía sustancialmente dependiendo del método empleado. Por ejemplo, en las reacciones termoquímicas, es fundamental que los catalizadores mantengan su estabilidad a temperaturas elevadas. Por otro lado, en el método electroquímico, el catalizador debe ser capaz de minimizar la competencia de la formación de H₂ en la reacción. Por último, en el método fotoquímico, se requiere un semiconductor con una banda prohibida mínima de 1.23 eV (Peter, 2018, p 1557).

Catalizador de doble membrana

En un prometedor avance hacia una economía más sostenible, un grupo de investigadores de la Universidad de Cambridge (Bhattacharjee, 2023, p 182) ha desarrollado un reactor impulsado por energía solar, utilizando botellas de plástico y dióxido de carbono para obtener combustibles y otros productos químicos. El reactor solar fotoelectroquímico (PEC) tiene dos compartimentos, separados por una membrana, con un electrodo en cada lado. En el electrodo negativo (fotocátodo), a base de perovskita, se integran diferentes catalizadores de reducción del CO₂ como una

porfirina de cobalto, una aleación $\text{Cu}_{91}\text{In}_9$ o la enzima formiato deshidrogenasa, que convierten el CO_2 en monóxido de carbono (CO), gas de síntesis 'syngas' (CO más H_2) o formiato (HCO_2^-), respectivamente. Mientras en el electrodo positivo (ánodo), de una aleación $\text{Cu}_{27}\text{Pd}_{73}$, en una disolución alcalina se transforman las botellas de plástico de tereftalato de polietileno en glicolato, una sustancia química utilizada en las industrias farmacéuticas y cosméticas. Los investigadores primero limpian y cortan las botellas de plástico en trozos, las sumergen en nitrógeno líquido y luego las pulverizan para crear una sustancia uniforme (Figura 3).

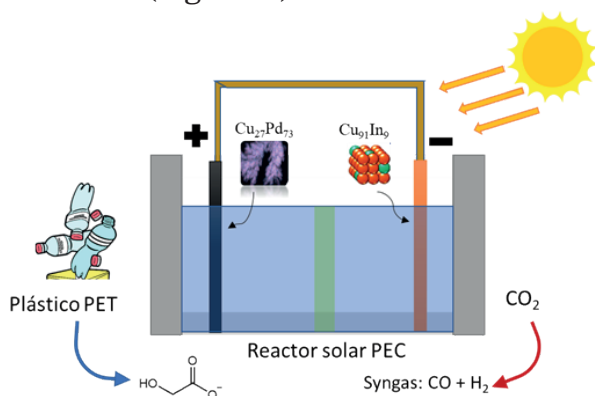


Figura 3. Ciclo general de la celda fotoelectroquímica (PEC) que ilustra la conversión de CO_2 y plástico de tereftalato de polietileno (PET) en diversos materiales.

El sistema fotoelectroquímico general de un solo absorbente de luz funciona con la ayuda de una polarización química interna y bajo voltaje aplicado, de manera similar a los tándems de absorbentes de luz duales sin polarización, y muestra tasas de producción entre 10 y 100 veces más altas que las de los procesos de suspensión fotocatalítica convencionales. Este logro demuestra que la transformación fotoelectroquímica eficiente de CO_2 en combustible, acoplada a la conversión

de plástico en otros productos químicos, es una tecnología prometedora y sostenible impulsada por la luz solar. Es esencial que los electrones generados por la luz solar posean la energía adecuada para favorecer la conversión del CO_2 . Este tipo de procesos se están volviendo cada vez más viables gracias a los avances en los catalizadores activados por luz solar, conocidos como fotocatalizadores. Normalmente, los fotocatalizadores son semiconductores que requieren luz ultravioleta para generar la energía necesaria en la transformación del dióxido de carbono. Sin embargo, la luz ultravioleta es escasa (representando sólo el 5 por ciento de la luz solar) y dañina para el ser humano. El desarrollo de nuevos catalizadores que funcionen con luz visible, más abundante y benigna, ha sido, por lo tanto, un objetivo principal. En años recientes, los investigadores han desarrollado varios fotocatalizadores que rompen el doble enlace entre el oxígeno y el carbono en la molécula de dióxido de carbono. Éste es un paso crítico en la creación de "refinerías solares" que produzcan compuestos a partir de este gas. El catalizador ahora sólo requiere luz visible para generar productos químicos ampliamente utilizados como el ácido fórmico, el metanol y el formaldehído, que son esenciales en la fabricación de productos como espumas, adhesivos y desinfectantes, además sirven en la elaboración de medicamentos, detergentes, fertilizantes y textiles (Viswanathan, 2014, p 211).

En los laboratorios mencionados anteriormente, los científicos están colaborando en el diseño de fotocatalizadores más eficientes en la conversión, impulsada por la luz solar, del dióxido de carbono en productos químicos deseados. Esta mejora podría llevarnos un paso más cerca de

eliminar por completo la dependencia de los combustibles fósiles en la producción química. Además, las investigaciones también se centran en optimizar los procesos de conversión para que sean más eficaces y económicamente viables a gran escala. Al transformar el dióxido de carbono en productos valiosos, se estará un paso más cerca de formar parte de una economía sin residuos. (Balzani, 2019, p 443222).

Generando Syngas con Energía Solar

El gas de síntesis o syngas, una mezcla de gases mayormente compuesta por hidrógeno y monóxido de carbono, con un poco de metano (CH₄), comúnmente se produce a partir de combustibles fósiles mediante un proceso llamado reformado, el cual es un proceso muy endotérmico (costoso) y emite grandes cantidades de CO₂. Esta mezcla de syngas se puede utilizar para generar petróleo sintético y combustibles líquidos. A pesar de los avances, la síntesis fotocatalítica de syngas a partir de CO₂ y H₂O sigue siendo un desafío importante debido a la ineficiente captura de fotones y a la rápida recombinación hueco-electrón. Un grupo de científicos ideó un método mediante la simple adición de CO₂, H₂O y luz solar, utilizando un material especial (cocatalizador dual), núcleo/capa de oro y óxido de cromo(III), sobre un semiconductor de InGaN/GaN crecido sobre un sustrato de silicio. Ellos lograron controlar las relaciones Au:Cr₂O₃ para obtener rendimientos muy altos de H₂ y CO en variadas proporciones, así como la eficiencia “luz solar a syngas” STS (solar to syngas) en función también de las relaciones Au:Cr₂O₃. El cocatalizador, promueve la deformación de la molécula lineal de CO₂ reduciendo la barrera energética para la reducción del CO₂ hacia CO y, al mismo tiempo, promueve el desdoblamiento del

H₂O generando el H₂; haciendo posible acoplar la reacción de reducción de CO₂ y la electrólisis del H₂O, y permitiendo modular las relaciones CO/H₂ obtenidas en un amplio intervalo. Estas últimas relaciones son cruciales porque afectan la producción posterior de combustibles o productos químicos específicos. En suma, la adición del cocatalizador al sistema de reactivos equivale a introducir un turbo a la reacción, permitiendo ajustar las proporciones de CO y H₂ obtenidas. El proceso puede escalar a nivel industrial. Aunque en estos experimentos se empleó agua destilada, se espera que funcionen también con agua de mar y otras disoluciones electrolíticas, ampliando así las materias primas. Este proceso eficiente y escalable, de producción de syngas mediante energía solar, representa un paso importante hacia una refinería química *neutra en carbono* (es decir, sin emitir CO₂ a la atmósfera) (Rashid, 2022, p 119).

El uso de CO₂ en la producción de queroseno

La producción de queroseno, vía un ciclo redox termoquímico a base de CeO₂, a partir de H₂O y CO₂ mediante energía solar, se logró por primera vez en una planta de torre solar completamente integrada. Este queroseno, fabricado con energía solar, tiene el potencial de reemplazar al queroseno de origen fósil, que se emplea en la infraestructura de los motores de los aviones ya existentes a nivel mundial, especialmente vitales para los vuelos de larga distancia. Esta innovadora demostración tecnológica a escala piloto, relevante para la implementación industrial, marca un nuevo giro hacia la producción de combustibles de aviación sostenibles. Una ventaja distintiva de este tipo de procesos, en comparación con otros de enfoque solar, radica

en su capacidad para controlar el flujo de H_2O y CO_2 de manera simultánea o independiente. Esto permite un control preciso de la calidad del gas de síntesis obtenido (mezcla de H_2 y CO), en términos de pureza y estequiometría, obteniendo así una mezcla óptima para la síntesis del queroseno vía el proceso Fischer-Tropsch (FT). Si bien se pueden implementar múltiples antenas solares, éstas tienen limitaciones de tamaño debido a restricciones mecánicas y ambientales, las plantas de torre solar en cambio ofrecen ventajas de economía de escala. La planta de combustibles de torre solar está integrada por tres subsistemas: la torre de concentración solar, el reactor solar ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}$), y la unidad gas a líquido (GtL) (proceso FT). La tecnología de torre solar es una perspectiva prometedora y representa un hito en la cadena de procesos de conversión de energía solar a combustibles (Figura 4). Esta planta a escala piloto, allana el camino hacia la implementación global de la producción de combustibles solares, si se captura CO_2 del aire o se obtiene de fuentes biogénicas (Zoller, 2022, p 1606).

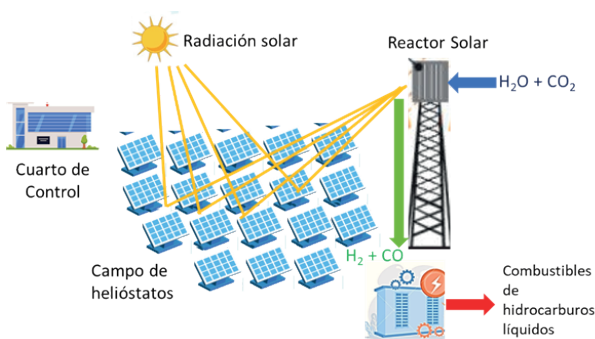


Figura 4. Planta de combustible de torre solar con instalaciones de concentración, torre solar y área de procesamiento.

Una alternativa para la producción de los plásticos

El lado oscuro de los desechos plásticos

puede eclipsar su importancia: sin duda, el plástico revolucionó la vida en el siglo XX, duradero, maleable y versátil. Sin plástico, no se tendrían grabaciones de la música y las películas. La medicina moderna utiliza también el plástico: bolsas de sangre, jeringas y tubos flexibles. Piezas de automóviles, materiales ligeros para aeronaves, satélites y transbordadores espaciales, todos dependen del plástico. Y, por supuesto, las computadoras, teléfonos y todas las formas de tecnología de internet. Casi todas las personas que leen estas palabras lo hacen gracias al plástico. Aparte del problema de la eliminación, también se debe considerar el origen del plástico. Es fácil olvidar que los plásticos están hechos de combustibles fósiles. Alrededor del 4% del petróleo y el gas que utilizamos anualmente se destina a la producción de polímeros, lo que significa que la producción de plástico está vinculada a la extracción de combustibles fósiles y al cambio climático. Hay una alternativa que los químicos han estado persiguiendo durante más de una década, y después del trabajo de varios investigadores empieza a dar sus frutos: plásticos hechos a partir de dióxido de carbono. Actualmente los investigadores están trabajando en métodos para capturar emisiones industriales de CO_2 y de ahí poder generar diversos plásticos. No solo reduciría la cantidad de combustibles fósiles que utilizamos, sino que también tendría un impacto en el cambio climático reduciendo la cantidad de gases de efecto invernadero (Peter, 2018, p 1557). En este sentido, los científicos han desarrollado un método para convertir el dióxido de carbono en etileno, la materia prima utilizada para fabricar el plástico más comúnmente utilizado que es el polietileno. Aproximadamente la mitad del plástico que se produce a nivel mun-

dial se crea con etileno, lo que convierte a éste en una de las materias primas más importantes del mundo. Puede que se necesiten unos 20 años para producir comercialmente el polietileno a partir de etileno hecho de dióxido de carbono. Se han realizado numerosos estudios que aprovechan la luz solar para llevar a cabo la conversión de CO₂ mediante fotocatalizadores o semiconductores, conocidos como procesos fotosintéticos (PS) y fotocatalíticos (PC). La clave para hacer plástico a partir de dióxido de carbono radica en el diseño de catalizadores (materiales que aceleran la velocidad de una reacción química sin agotarse en el proceso) sofisticados. Un grupo de investigadores ha desarrollado un método innovador de electro-redeposición de Cu para estabilizar algunas especies de Cu⁺ y optimizar su morfología, con el fin de que tengan un impacto significativo en la producción activa de etileno (De Luna, 2018, p 103). Los resultados, revelan que esta estrategia mejora la estabilidad de las especies de Cu⁺ incluso a potenciales negativos, manteniéndose efectiva durante largos períodos de reacción. Al controlar la morfología y el estado de oxidación del catalizador, se puede reducir la producción de metano y aumentar significativamente la producción de etileno.

En el Reino Unido, *Econic* también está produciendo poliuretano a partir de dióxido de carbono y espera tenerlo en los estantes dentro de dos años, así como recubrimientos, selladores y elastómeros. Estos materiales no solo igualan la calidad de los plásticos convencionales, sino que en algunos aspectos incluso pueden superarlos. *Econic* estima que si el 30 por ciento de todos los polioles (los polioles son compuestos químicos que contienen múltiples grupos hidroxilo “OH”) se fabricaran

a partir de dióxido de carbono, esto resultaría en un ahorro de millones de toneladas de dióxido de carbono en la atmósfera, que sería equivalente a aumentar millones de árboles o retirar gran cantidad de autos de la carretera (<https://www.science.org/content/article/two-new-ways-turn-garbage-carbon-dioxide-fuel>).

En un avance significativo, se ha desarrollado una alternativa para producir policarbonato, un material común en domos, ventanas y envases reutilizables como biberones. Esta innovación implica combinar dióxido de carbono con azúcares, como la xilosa, que se encuentra en fuentes fácilmente accesibles como posos de café. A diferencia de los métodos convencionales que utilizan sustancias tóxicas, como el fosgeno y el bisfenol-A, esta nueva técnica se destaca por su seguridad, lo que la hace apropiada para materiales de aplicaciones médicas, tales como suturas e incluso estructuras de órganos (<https://www.science.org/content/article/two-new-ways-turn-garbage-carbon-dioxide-fuel>).

La reducción de CO₂ a CO, a través de la reacción, $\text{CO}_2 + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$, genera un producto químico rico en energía que puede combinarse con el H₂O a través de la reacción de desplazamiento gas-agua y producir H₂, y así la mezcla CO/H₂ puede conducir a la producción de combustibles líquidos por el método Fischer-Tropsch, sin embargo, se requiere un electrocatalizador que sea eficiente. El bismuto, en conjunción con líquidos iónicos, se presenta como un económico prometedor candidato para este proceso, Bi-CMEC (Bismut-Carbon Monoxide Evolving Catalyst), ya que este metal no sólo es amigable con el medio ambiente al ser no tóxico, sino que también se obtiene como subproducto del refinado de

plomo (Pb), cobre (Cu) y estaño (Sn), lo que garantiza un suministro constante. Además, dado que el bismuto no tiene numerosas aplicaciones comerciales importantes, su precio se mantiene asequible y estable (DiMeglio, 2013, p8798). Se probó la capacidad del electrodo bimodificado para activar electroquímicamente el CO_2 en MeCN, un disolvente que ofrece una amplia ventana electroquímica y se utiliza con frecuencia en la electrocatálisis del CO_2 .

La colaboración entre académicos, empresas emergentes y líderes industriales será esencial para llevar estos avances, de hacer el mejor uso de energía perenne (solar, eólica, hidráulica y geotérmica-SWHG) y renovable (biomasa) en conjunción con el uso y reciclaje del CO_2 , a la corriente principal y convertir la visión de una economía circular en una realidad. La economía circular y la bioeconomía se fusionan en una estrategia global que busca reciclar el carbono a través de la conversión del CO_2 . El uso de energía solar para el coprocesamiento del H_2O y el CO_2 permite convertir dos moléculas muy estables en productos útiles, como hidrocarburos ricos en energía o sus derivados, más oxígeno, que puede recolectarse por separado y ser comercializado. Éste es un futuro, que imita plenamente los procesos naturales. El objetivo es cambiar de una economía lineal que produce residuos a una economía cíclica que imita a la naturaleza, reciclando bienes usados y reduciendo la extracción de recursos naturales y la carga ambiental. Esto implica el uso de energía solar y sistemas biológicos para reducir la huella de carbono y avanzar hacia un futuro más sostenible (Aresta, 2020, p159). A medida que los avances de la química en la transformación sostenible se aceleran, nos encontramos en una encrucijada crítica.

ca. La elección de adoptar y apoyar estas tecnologías prometedoras, que representa un compromiso con un futuro más limpio y sostenible, o continuar con metodologías contaminantes que conducen al deterioro extremo o catastrófico del planeta. La oportunidad de convertir el dióxido de carbono en una valiosa materia prima química y eliminar gradualmente nuestra dependencia de los combustibles fósiles está al alcance de la mano.

Conclusión

La conversión de CO_2 juega un papel fundamental en la transición hacia una economía sostenible. La capacidad de reutilizar este gas para producir productos químicos y combustibles no solo contribuye a la reducción de emisiones, sino también fomenta el aprovechamiento de este gas contaminante. Esto nos acerca a la visión de una nueva industria química, que considere al CO_2 como una fuente abundante de carbono y se convierta en parte de una economía circular sin residuos.

En este contexto, la energía solar se presenta como una aliada para los procesos de transformación del CO_2 . Tecnologías como la fotoelectroquímica, la fotocatálisis y la fotoelectrosíntesis ofrecen alternativas limpias y prometedoras frente a los métodos tradicionales que dependen de combustibles fósiles. Innovaciones como el desarrollo de fotocatalizadores activos bajo luz visible permitirán superar barreras energéticas y aumentar las tasas de conversión, acercando cada vez más estas tecnologías a su implementación a gran escala.

Además, la transformación del CO_2 abre la puerta a una amplia gama de productos derivados, como metanol, ácido fórmico, formaldehído y syngas, todos con aplica-

ciones industriales. Procesos innovadores, como la conversión simultánea de CO₂ y plásticos, amplían las oportunidades para una industria más sostenible y rentable.

Estos avances científicos no sólo son un paso adelante en la batalla contra el cambio climático, sino que también representan un esfuerzo en reducir las emisiones de carbono. La siguiente fase implica la incorporación de estos logros en la infraestructura de la industria química a gran escala, lo cual demandará la necesidad de fuertes inversiones y colaboraciones estratégicas entre los sectores público y privado.

Las iniciativas internacionales y los programas de financiamiento desempeñan un papel fundamental en este contexto, sin embargo, aún persisten desafíos que deben abordarse para garantizar la adopción masiva y la sostenibilidad a largo plazo de estas tecnologías. La colaboración interdisciplinaria entre la academia, la industria y los tomadores de decisiones será esencial para superar estos obstáculos, asegurando que se prioricen la sostenibilidad ambiental y económica en cada paso del proceso.

Referencias

Aresta, M., y Dibenedetto A., Carbon Recycling Through CO₂-Conversion for Stepping Toward a Cyclic-C Economy. A Perspective. *Front. Energy Res.*, 8, 159, 2020. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00159>.

Balzani, V., Pacchioni, G., Prato, M. y colaboradores. Solar-driven chemistry: towards new catalytic solutions for a sustainable world. *Rend. Fis. Acc. Lincei*, 30, pp.443–452, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12210-019-00836-2>.

Bhattacharjee, S., Rahaman, M., Andrei, V. y colaboradores. Photoelectrochemical CO₂-to-fuel conversion with simultaneous plastic reforming. *Nat. Synth.*, 2, pp.182–192 2023. <https://doi.org/10.1038/s44160-022-00196-0>.

De Luna, P., Quintero-Bermudez, R., Dinh, CT. y colaboradores. Catalyst electro-redeposition controls morphology and oxidation state for selective carbon dioxide reduction. *Nat Catal.*, 1, pp.103–110, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41929-017-0018-9>.

DiMeglio, J. L. y Joel Rosenthal. Selective Conversion of CO₂ to CO with High Efficiency Using an Inexpensive Bismuth-Based Electrocatalyst. *J. Am. Chem. Soc.*, 135[24], pp.8798-8801, 2013. <https://doi.org/10.1021/ja4033549>.

Gomes, C. Das N., Jacquet, O., Villiers, C., Thuéry, P., Ephritikhine, M. y Cantat, T. A Diagonal Approach to Chemical Recycling of Carbon Dioxide: Organocatalytic Transformation for the Reductive Functionalization of CO₂. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 51, pp.187-190, 2012. <https://doi.org/10.1002/anie.201105516>.

He, J., y Janáky, C. Recent Advances in Solar-Driven Carbon Dioxide Conversion: Expectations versus Reality. *ACS Energy Letters*, 5[6], pp.1996-2014, 2020. <https://doi.org/10.1021/acscenergylett.0c00645>.

Kron, K. J., Gomez, S. J., Mao, Y., Cave, R. J., y Sharada, S. M. Computational Analysis of Electron Transfer Kinetics for CO₂ Reduction with Organic Photoredox Catalysts. *The Journal of Physical Chemistry A*, 124[26], pp.5359-5368, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.0c03065>.

- Peter, S. C. Reduction of CO₂ to Chemicals and Fuels: A Solution to Global Warming and Energy Crisis. *ACS Energy Letters*, 3[7], pp.1557-1561, 2018. <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.8b00878>.
- Rashid, R. T., Chen, Y., Liu, X., Zhou, B., y colaboradores. Tunable green syngas generation from CO₂ and H₂O with sunlight as the only energy input. *PNAS*, 119[26], e2121174119, 2022. <https://doi.org/10.1073/pnas.2121174119>.
- Viswanathan, B. Reduction of Carbon Dioxide: Photo-Catalytic Route to Solar Fuels. Lee, J. (eds) *Materials and Processes for Solar Fuel Production*. Nanostructure Science and Technology, vol 174. Springer, New York, NY. p211, 2014. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1628-3_11.
- Yau, M. C. M., H. Martin y Kalathil, S. Biocatalytic conversion of sunlight and carbon dioxide to solar fuels and chemicals. *RSC Adv.*, 12, 16396, 2022. <https://doi.org/10.1039/d2ra00673a>.
- Zoller, S., Koepf, E., Nizamian, D., Stephan, M., Patane, A., Haueter, P., Romero, M., Gonzalez-Aguilar, J., Lieftink, D., Wit, de E., Brendelberger, S., Sizmann, A., y Steinfeld, A. A solar tower fuel plant for the thermochemical production of kerosene from H₂O and CO₂. *Joule*, 6[7], P1606-1616, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.06.012>.