

El poder de la electricidad para cerrar el ciclo del carbono

Núria Fort Compte y Anna M. Masdeu Bultó.

Cátedra para la Transición Energética sobre Captura y aprovechamiento de CO₂

Fundación Repsol - Universitat Rovira i Virgili

Los combustibles fósiles generan grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) en los procesos de generación de energía y transporte. Para cerrar el ciclo del carbono y alcanzar el objetivo de emisiones netas cero, el CO₂ se debería capturar y reconvertir en combustibles o en productos químicos de interés industrial. En la actualidad, los productos de uno o más carbonos como el monóxido de carbono (CO), gas de síntesis (mezclas hidrógeno/CO), metano, metanol, ácido fórmico o etileno se obtienen a partir de productos derivados de gas natural o del petróleo. El reto es poder reutilizar el CO₂ para regenerar estos productos. La utilización de la energía eléctrica a partir de renovables para transformar el CO₂ usando electrocatalizadores puede permitir disminuir las emisiones de estos procesos, aumentar su selectividad y almacenar en forma de productos químicos una energía que se genera de manera intermitente. En esta nota técnica se describen los procesos que están en unas fases más avanzadas de desarrollo tecnológico, se comparan los costes estimados con los procesos actuales y se analizan los retos y perspectivas de futuro.

Introducción

La acumulación en la atmósfera de gases con efecto invernadero (GHG), entre ellos el dióxido de carbono (CO₂), está generando una crisis climática con graves consecuencias socioeconómicas. Este panorama ha impulsado las energías renovables, la reducción o eliminación de las emisiones de GHG y la captura del CO₂ tanto de los puntos de emisión como del aire. Así, de las emisiones anuales antropogénicas de CO₂ (39 Gt en 2023 según la Agencia Internacional de la Energía, IEA),^[1] se prevé que en 2050 se alcance la captura de 4 Gt de este gas,^[2,3] para su

almacenaje y transformación a productos de interés (CCUS).^[4] El destino final mayoritario es su incorporación en la corteza terrestre por procesos de mineralización y solo una pequeña proporción se transforma en productos de interés industrial. Su baja utilización se debe a su elevada estabilidad e inercia cinética, que requiere de una elevada energía para su activación y la necesidad de utilizar catalizadores que aceleren la reacción.^[5] La activación del CO₂ se puede promover por procesos biológicos, fotoquímicos y electroquímicos. El reciente desarrollo de las energías fotovoltaicas está generando la oportunidad de obtener energía eléctrica con bajas emisiones de CO₂, y abre, por tanto, la posibilidad de su uso en el proceso de transformar el CO₂ de manera sostenible a productos de interés como combustibles y productos químicos basados en carbono.

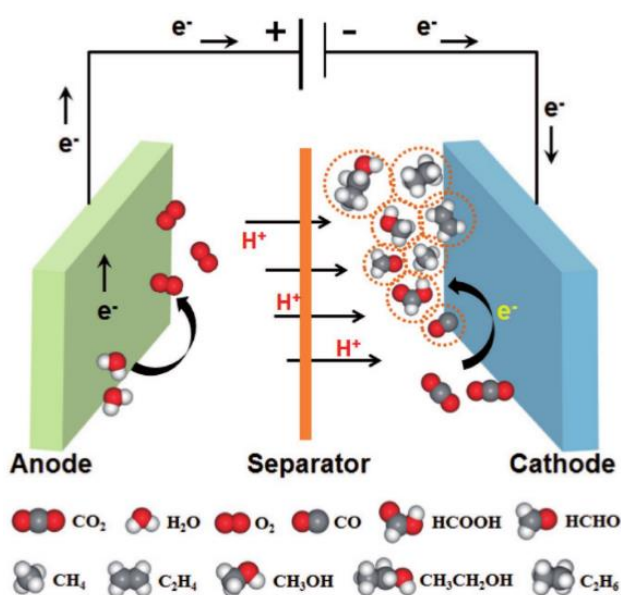


Figura 1. Diagrama esquemático del sistema de reacción de reducción electroquímica de CO₂. Reproducido bajo la licencia de CC de 4.0.^[6]

En un proceso electroquímico se utiliza la energía eléctrica en una celda electrolítica para generar productos de reducción en el polo negativo, el cátodo, hacia donde viajan los electrones, y de oxidación, en el polo positivo, el ánodo, de donde surgen los electrones (Figura 1). Entre los productos de reducción del CO₂ destacan los compuestos con un carbono como el monóxido de carbono (CO), el ácido fórmico

(HCOOH), el metano (CH_4), el metanol (CH_3OH) y aquellos productos con dos o más átomos de carbono como el etileno (C_2H_4), el etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) y otros hidrocarburos, siendo estos últimos más difíciles de obtener. Además, la reducción electroquímica del CO_2 (ECO_2R) ofrece una solución a los retos de la generación intermitente de energía eléctrica renovable permitiendo acumular la energía en forma productos químicos.^[7]

Aunque la ECO_2R tiene todavía grandes retos a superar puesto que las conversiones (el % de gas convertido) y los rendimientos faradaicos (una medida de la energía eléctrica usada respecto a la empleada) son todavía bajos, hay algunos procesos, como son la obtención de CO, gas de síntesis y ácido fórmico que se encuentran en estadios de desarrollo tecnológico (TRL) más avanzados.^[7,8]

Reducción electrocatalítica de CO_2

El CO y, en especial, el gas de síntesis son intermedios fundamentales para la obtención de combustibles mediante el proceso Fisher-Tropsch (fuel, gasolina, keroseno) y de productos químicos (por ejemplo aldehídos para la industria de tensioactivos y alcoholes utilizados para disolventes). El CO se obtiene industrialmente mediante el reformado del gas natural o nafta con vapor de agua o a través de la reacción inversa de desplazamiento del gas de agua en presencia de catalizadores basados en metales como el níquel a elevadas temperaturas (800-900 °C) y presiones (1,4-3,0 MPa).^[9] En estos procesos se obtienen mezclas de gases ($\text{H}_2/\text{CO}/\text{CO}_2/\text{CH}_4$) y vapor de agua por lo que se requiere una etapa de purificación. Así, pues el desarrollo de procesos electroquímicos más selectivos, que permitan reducir costes y evitar los concomitantes procesos de pasivación por sinterización y por deposición de carbono^[10] es esencial para impulsar la transformación del CO_2 .

En estos momentos, los electrolizadores de conversión a CO a alta temperatura son los que se encuentran más avanzados. Concretamente, Topsoe ha desarrollado electrolizadores de los llamados celda de óxido sólido (SOEC) a escala comercial formándose oxígeno en el ánodo. Para ello se utilizan cátodos de Ni con zirconia estabilizada con ytrio (Ni-YSZ) y ánodos basados en perovskitas con metales como cobalto, hierro, lantano entre otros que demuestran una eficiencia farádica alta

(aproximadamente del 100 %), con una estabilidad de de unas 8000 horas^[8] operando a alta temperatura (600–800°C).^[11] El coste estimado del CO obtenido mediante un proceso de este tipo es del orden de 10-27 superior a los procesos a partir de productos fósiles.^[8]

Otros proyectos en marcha tienen por objetivo combinar la electrólisis del CO₂ con la electrólisis del agua para obtener mezclas de gas de síntesis para fabricar combustibles sintéticos mediante el proceso Fisher-Trops. Además, se puede combinar con la captura del CO₂ del aire, con la tecnología desarrollada por Climeworks, para contribuir a cerrar el ciclo del carbono. En este sentido, se planea desarrollar electrolizadores modulares de electrólisis a alta temperatura con el socio noruego Nordic Blue Crude en el Parque Industrial Heroya (Porsgrunn, Noruega) con previsión de funcionamiento en 2029. El objetivo es alcanzar una producción de 10 millones de litros de gasolina anual.^[12] Con esta planta en funcionamiento se prevé evitar 21000 t de emisiones de CO₂/año aprovechando calor industrial y energía hidroeléctrica del entorno. Objetivos modestos en comparación del consumo de crudo mundial anual pero significativo a nivel de potencialidad de escalado. El coste estimado del gas de síntesis obtenido es inferior al caso anterior pero todavía supera en 4-11 veces a los procesos a partir de productos fósiles.^[8]

El reto está en conseguir catalizadores más activos que puedan funcionar a más bajas temperaturas. Así, aunque con resultados de producción más modestos, Twelve, ha puesto en marcha un electrolizador que convierte 2 kg CO₂/día con un posible escalado de hasta 350 kg CO₂/día con el objetivo de alcanzar 5 t /día.^[11] La base es la tecnología Leaf™, conjunto de electrodos de membrana (MEA) que impulsan la conversión de CO₂ y agua en gas de síntesis, posteriormente convertido en combustibles y productos químicos como E-Jet® SAF y E-Naphtha mediante un proceso conocido como Power-to-Liquid, que forma parte de la vía más amplia de Power-to-X.^[13,14] Aunque la electrólisis se realiza a baja temperatura, el bajo TRL hace que el coste estimado sea superior al del proceso a alta temperatura resultando entre 28-72 veces más caro que el proceso actual.^[8]

Otro producto de gran interés comercial es el ácido fórmico que puede ser un medio de almacenamiento de hidrógeno y tiene otras muchas aplicaciones en la industria textil y de limpieza y como intermedio de síntesis de varios compuestos orgánicos.^[15] Industrialmente el ácido fórmico se obtiene como subproducto en la síntesis de ácido acético^[15] o la carbonilación de metanol con CO seguida de una hidrólisis.^[15] Estos dos métodos resultan muy poco sostenibles por el gran consumo energético y la gran cantidad de residuos generados.^[15] La electrólisis de CO₂ para obtener ácido fórmico se encuentra en un nivel menos avanzado para la comercialización (TRL 3-5). Utiliza electrodos de difusión de gases en medio ácido para evitar la formación de formiato y un sistema con membranas de intercambio de cationes para obtener el ácido fórmico líquido que se separa por destilación.^[8] Recientemente, OCOChem^[16] en colaboración con Haliburton Labs, ha anunciado la puesta en marcha de su planta piloto de Richland (Washington) con una capacidad de producción en de 60 t anuales de ácido fórmico.^[17] Un estudio previo, estima que el coste de producción electrolítica de ácido fórmico sería unas 5 veces superior al del proceso actual.^[8]

Las tecnologías de conversión de CO₂ a olefinas son muy interesantes puesto que abrirían la posibilidad de producción de los polímeros más utilizados. Estos procesos se encuentran en estadios muy preliminares (TRL 3-5) pero hay varias empresas, start-ups y centros de investigación interesadas en la vía electroquímica.^[18-20] Para estos procesos se utilizan celdas electrolíticas de membrana y la selectividad en etileno, la olefina más obtenida, es baja formándose otros productos como monóxido de carbono, etanol y hidrógeno, como producto de reducción competitiva. Se requieren catalizadores basados en cobre, un medio alcalino fuerte en el cátodo, lo que conlleva pérdidas de CO₂ por formación de carbonatos que pueden migrar a través de la membrana de la celda electroquímica. Con estos sistemas se alcanzan eficiencias faradaicas de hasta el 65% pero con una conversión de CO₂ baja (20%) con lo que se requiere la separación de gases que encarece el proceso,^[19] estimándose costes del orden de 47-80 veces superiores a los procesos industriales actuales.^[8]

Retos y perspectivas futuras

Aunque existen procesos con TRL elevados, la ECO₂R tiene todavía grandes retos a superar. En primer lugar, las conversiones en muchos casos y los rendimientos faradaicos son todavía bajos.^[7] Sumados a esto, los estudios de proyección de costes^[8] refleja que, en el mejor de los casos, gas de síntesis y ácido fórmico, todavía los costes estarían sobre 4-5 veces superiores a los procesos actuales.

Un punto clave para aumentar la competitividad es el desarrollo de los electrolizadores que se puede beneficiar del desarrollo de procesos electrolíticos similares (proceso cloro-alkali).^[21] La vida útil de operación, que hasta la fecha se evalúa como una media en unas 5000 horas, debido a la estabilidad de catalizadores y electrodos, es uno de los puntos débiles que puede estar condicionado por la pureza del CO₂ cuyos contaminantes, especialmente productos de azufre, puede producir la desactivación de los catalizadores.^[8] A estas consideraciones hay que sumar, la necesidad de metales para la construcción de electrodos y catalizadores, a menudo constituidos por metales presentes en minerales críticos y tierras raras. Hay que tener en cuenta el contexto de demanda creciente por la transición energética^[22] y la preocupación, no solo de tener suministro asegurado, (European Critical Raw Materials Act)^[23] sino de cerciorarse que la extracción minera incorpora criterios de prácticas responsables a efectos medioambientales, y de garantías socioeconómicas y de seguridad de los trabajadores.^[24,25]

Para la viabilidad económica será interesante que se puedan obtener conjuntamente productos de valor añadido. En el caso de la electrólisis del CO₂ en medio acuoso, el producto de oxidación es el oxígeno, de poco valor comercial. Además, debido a su baja cinética, la formación de oxígeno es el proceso limitante que consume entorno al 90% del potencial eléctrico de la celda electrolítica. Por lo tanto, sería mucho más rentable, aprovechar el proceso de oxidación asociado a la reducción del CO₂ para obtener productos de valor económico añadido o para el tratamiento de aguas.^[26] Esta estrategia se ha estudiado para la obtención de productos de oxidación entre los que destacan como más viables, la oxidación de alcoholes^[27] y de derivados de biomasa.^[5,28,29] En

este mismo sentido, se está investigando el acoplamiento de la reducción electroquímica de CO_2 con la reacción con moléculas pequeñas para generar productos de valor añadido. Por ejemplo, se puede obtener urea o aminas orgánicas, acoplando la reducción de CO_2 con la reacción con nitrógeno, nitratos o nitritos. El acoplamiento con metanol puede generar dimetilcarbonato con CO como intermedio. El desarrollo de catalizadores que favorezcan estos procesos va a ser fundamental para poder ampliar la gama de productos obtenidos mediante electrólisis del CO_2 .^[30]

En cuanto a perspectivas futuras, la investigación actual se centra en desarrollar catalizadores para obtener productos de dos o más carbonos (C_{2+}).^[31] Para ello se requiere diseñar catalizadores activos para la reducción del CO_2 con otros activos en la reacción de acoplamiento carbono-carbono con el requerimiento que ambos actúen combinados y en el mismo medio de reacción. Alternativamente, otra de las soluciones que se está estudiando para favorecer la formación de C_{2+} es la electrólisis en tándem que consiste en una primera etapa de formación de CO que se electroliza a continuación a C_{2+} favoreciendo que se pueda incrementar la presión de CO.^[32] Mediante este proceso tándem, se puede obtener etileno o ácido acético/acetatos. Estos últimos productos no solo son importantes como intermedios en muchas síntesis, sino que también se está explorando la posibilidad de su transformación en alimentos a través de procesos de fermentación.^[32]

La reducción electrolítica del CO_2 requiere de sobrepotenciales que en algunos casos pueden ser elevados. Con el objetivo de reducir el sobrepotencial requerido, otra línea de investigación se centra en la utilización conjunta de materiales semiconductores y fotosensibles que favorezcan la disminución del sobrepotencial, con lo que se realizaría la electrólisis en presencia de luz en lo que se llama fotoelectrólisis.^[33]

En cuanto a retos de infraestructuras, los procesos industriales electroquímicos requieren la expansión y modernización de las redes de suministro eléctricas para poder alimentar los electrolizadores. Esto será necesario tanto para el incremento de los procesos de electrificación industriales por aumento de las energías renovables como también para los electrolizadores para la obtención de hidrógeno verde por lo que se

prevé que se vayan ampliando las redes eléctricas para asegurar el suministro de electricidad. También los suministros eléctricos tanto de cableado como de transformadores eléctricos van a competir y aumentaran los tiempos de suministro de materiales y de mano de obra especializada.^[34] Conseguir abastecer todas las necesidades de electricidad en un futuro electrificado va a suponer un gran desafío.

Conclusiones

La utilización de la energía eléctrica para la transformación de dióxido de carbono en productos como gasolinas sintéticas, monóxido de carbono y ácido fórmico es una realidad. Los procesos están en fase de producción a baja escala, pero con perspectivas de reducción de costes en las próximas décadas. La reutilización de este CO₂ supone un paso importante para cerrar el ciclo del carbono y contribuir al objetivo de reducción de emisiones hasta llegar al escenario de emisiones netas cero (*Net Zero*). La disminución de costes para hacer competitivos estos procesos dependerá de muchos factores entre los que se encuentra el precio de la energía, el desarrollo tecnológico de los electrolizadores y su estabilidad, la eficiencia de los catalizadores y electrodos y la fiscalidad aplicada a la reducción de emisiones de CO₂. En este punto, hay aspectos geoeconómicos relacionados con el acceso a los minerales críticos que van a ser fundamentales para poder escalar estos procesos que van a competir con las transformaciones de la transición energética. Ambos aspectos podrían beneficiarse, de tecnologías y necesidades comunes, en el mejor de los casos, aunque pueden también competir por necesidades de suministro de materiales. Finalmente, la co-producción de productos de valor añadido va a favorecer la viabilidad económica de los procesos electrolíticos. Para ello, el desarrollo de los catalizadores y tecnologías necesarios para producir selectivamente los productos deseados es un punto clave que requiere de esfuerzos de inversión en investigación y en formación de profesionales.

14/06/2025

Bibliografia

- [1] “EDGAR - The Emissions Database for Global Atmospheric Research,” can be found under https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2024, **n.d.**
- [2] J. Nöhl, J. Burger, P. Oeuvray, V. Becattini, J. Seiler, D. Y. Shu, M. Mazzotti, A. Bardow, *J Clean Prod* **2025**, 514, 145659.
- [3] *Global Gas Report 2024*, **2024**.
- [4] “Technology needs for net-zero emissions – Energy Technology Perspectives 2020 – Analysis - IEA,” can be found under <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020/technology-needs-for-net-zero-emissions#abstract>, **n.d.**
- [5] W. Zhong, W. Huang, S. Ruan, Q. Zhang, Y. Wang, S. Xie, *Chemistry - A European Journal* **2023**, 29, e202203228.
- [6] W. Zhang, Y. Hu, L. Ma, G. Zhu, Y. Wang, X. Xue, R. Chen, S. Yang, Z. Jin, *Advanced Science* **2018**, 5, 1700275.
- [7] C. Xu, P. Hong, Y. Dong, M. Robert, G. Shao, Y. Lei, *Adv Energy Mater* **2025**, 2406146.
- [8] R. J. Detz, C. J. Ferchaud, A. J. Kalkman, J. Kemper, C. Sánchez-Martínez, M. Saric, M. V. Shinde, *Sustain Energy Fuels* **2023**, 7, 5445–5472.
- [9] C. George, in *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, Wiley, **2001**.
- [10] M. González-Castaño, B. Dorneanu, H. Arellano-García, *React Chem Eng* **2021**, 6, 954–976.
- [11] B. Belsa, L. Xia, F. P. García de Arquer, *ACS Energy Lett* **2024**, 9, 4293–4305.
- [12] Sunfire, “Breakthrough for Power-to-X: Sunfire puts first co-electrolysis into operation and starts scaling | Sunfire,” can be found under

- <https://sunfire.de/en/news/breakthrough-for-power-to-x-sunfire-puts-first-co-electrolysis-into-operation-and-starts-scaling/>, **2019**.
- [13] “Twelve | The Carbon Transformation Company™,” can be found under <https://www.twelve.co/>, **n.d.**
- [14] T. Brix, *Carbon Capture Magazine* **2024**.
- [15] D. J. Drury, in *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, Wiley, **2013**, pp. 1–9.
- [16] “OCOchem Pioneers CO2 Electrolysis Technologies for Direct Conversion of CO2, Water, and Electrons into Organic Molecules – Halliburton Labs,” can be found under <https://halliburtonlabs.com/ocochem-is-pioneering-the-scale-up-of-co2-electrolysis-technologies-to-directly-convert-co2-water-and-electrons-into-organic-molecules/>, **n.d.**
- [17] J. St. John, *Canary Media* **2025**.
- [18] J. Wu, Y. Huang, W. Ye, Y. Li, J. Wu, Y. Huang, W. Ye, Y. Li, *Advanced Science* **2017**, 4, 1700194.
- [19] A. Prajapati, N. C. Kani, J. A. Gauthier, R. Sartape, J. Xie, I. Bessa, M. T. Galante, S. L. Leung, M. H. S. Andrade, R. T. Somich, M. V. Rebouças, G. T. Hutras, N. Diniz, M. R. Singh, *Cell Rep Phys Sci* **2022**, 3, 101053.
- [20] Z. Li, P. Wang, X. Lyu, V. K. R. Kondapalli, S. Xiang, J. D. Jimenez, L. Ma, T. Ito, T. Zhang, J. Raj, Y. Fang, Y. Bai, J. Li, A. Serov, V. Shanov, A. I. Frenkel, S. D. Senanayake, S. Yang, T. P. Senftle, J. Wu, *Nature Chemical Engineering* **2024**, 1, 159–169.
- [21] “Chlor-Alkali Solutions - thyssenkrupp nucera,” can be found under <https://www.thyssenkrupp-nucera.com/chlor-alkali-solutions/>, **n.d.**
- [22] International Energy Association, *Executive Summary – Global Critical Minerals Outlook 2024 – Analysis - IEA*, **2024**.

- [23] “European Critical Raw Materials Act,” can be found under [https://ec.europa-eu.sabidi.urv.cat/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1661](https://ec.europa.eu.sabidi.urv.cat/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1661), **n.d.**
- [24] K. C. M. E. W. S. F. Joyce Raboca, “Can government partnerships support responsible and reliable critical mineral supply chains? – Analysis - IEA,” can be found under <https://www.iea.org/commentaries/can-government-partnerships-support-responsible-and-reliable-critical-mineral-supply-chains?>, **2024**.
- [25] “The Role of Traceability in Critical Mineral Supply Chains – Analysis - IEA,” can be found under https://www.iea.org/reports/the-role-of-traceability-in-critical-mineral-supply-chains?utm_campaign=IEA+newsletters&utm_medium=Email&utm_source=SendGrid, **n.d.**
- [26] J. Jack, W. Zhu, J. L. Avalos, J. Gong, Z. J. Ren, *Green Chemistry* **2021**, 23, 7917–7936.
- [27] E. Pérez-Gallent, S. Turk, R. Latsuzbaia, R. Bhardwaj, A. Anastasopol, F. Sastre-Calabuig, A. C. Garcia, E. Giling, E. Goetheer, *Ind Eng Chem Res* **2019**, 58, 6195–6202.
- [28] N. P. Martínez, M. Isaacs, K. K. Nanda, *New Journal of Chemistry* **2020**, 44, 5617–5637.
- [29] Á. Vass, B. Endrődi, C. Janáky, *Curr Opin Electrochem* **2021**, 25, 100621.
- [30] L. Zuo, C. Yang, Z. Tang, *Adv Funct Mater* **2025**, 2502233.
- [31] K. A. Alkhuzai, S. H. Majid, E. A. M. Saleh, H. Esmaeili, *Catalysts* **2025**, 15, 237.
- [32] B. S. Crandall, S. Overa, H. Shin, F. Jiao, *Acc Chem Res* **2023**, 56, 1505–1516.
- [33] A. R. Paris, J. J. Frick, D. Ni, M. R. Smith, A. B. Bocarsly, in *An Economy Based on Carbon Dioxide and Water*, Springer International Publishing, **2019**, pp. 239–286.

- [34] “Building the Future Transmission Grid – Analysis - IEA,” can be found under https://www.iea.org/reports/building-the-future-transmission-grid?utm_campaign=IEA+newsletters&utm_medium=Email&utm_source=SendGrid, **n.d.**