

Temática: Nuevos materiales y Procesos sostenibles

Referencia: (a indicar por la organización)

## TECNOLOGÍA CÍCLICA CO<sub>2</sub>-SR CON CATALIZADORES HÍBRIDOS: UNA VÍA ALTERNATIVA PARA LA CAPTURA, ALMACENAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE CO<sub>2</sub> CON CH<sub>4</sub>

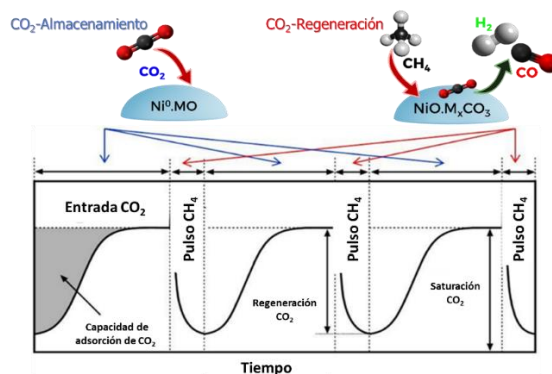
S. Essounani-Mérida, S. Molina-Ramírez, M. Cortés-Reyes, C. Herrera, M.A. Larrubia,  
L.J. Alemany\*

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga 29071, Málaga, España  
lujjo@uma.es

**Palabras clave:** Captura de CO<sub>2</sub>, regeneración con CH<sub>4</sub>, Gases de Efecto Invernadero, catalizadores no soportados

### 1 Resumen.

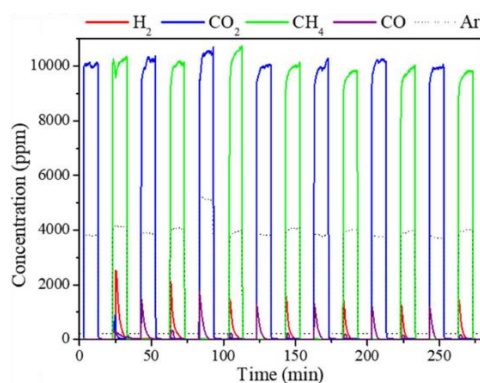
En el marco del Proyecto de Investigación PID2021-124098OB-I00, se presentan los avances más recientes en el desarrollo de tecnologías catalíticas avanzadas para la captura y valorización del CO<sub>2</sub>. Ante el agravamiento del calentamiento global asociado a las crecientes emisiones de gases de efecto invernadero —principalmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>)—, se vuelve prioritario impulsar soluciones integradas que permitan no solo mitigar estas emisiones, sino también transformarlas en productos útiles. En esta línea, el grupo de investigación ha explorado distintas rutas de valorización del CO<sub>2</sub>, entre las que destacan la hidrogenación catalítica empleando sistemas en tándem basados en níquel y zeolitas, la captura selectiva mediante materiales híbridos funcionalizados, y el diseño y validación de la tecnología cíclica CO<sub>2</sub>-SR (*Storage and Regeneration*). Esta última se configura como una alternativa innovadora dentro del campo de la captura y uso del carbono (CCU), al combinar en un solo esquema la captura directa del CO<sub>2</sub> con su posterior conversión mediante reformado seco con CH<sub>4</sub>, todo ello integrado en un proceso cíclico alternante. El sistema consiste en una primera etapa de almacenamiento de CO<sub>2</sub>, seguida de una etapa de regeneración endotérmica en presencia de metano, durante la cual se favorece la conversión selectiva hacia gas de síntesis (CO + H<sub>2</sub>), útil como plataforma intermedia para la producción de compuestos químicos o combustibles (Figura 1). El núcleo de esta tecnología reside en el desarrollo de materiales catalíticos híbridos multifuncionales, formulados para operar de forma estable en condiciones cíclicas. Estos materiales integran, en una sola fase activa, componentes adsorbentes de CO<sub>2</sub> basados en metales alcalinos y alcalinotérreos, junto con sistemas redox de níquel metálico para la conversión eficiente del CO<sub>2</sub>. La arquitectura estructural de estos catalizadores ha sido optimizada para resistir los cambios térmicos y químicos asociados al proceso cíclico, permitiendo su implementación en un solo reactor y promoviendo una operación selectiva, modular y eficiente. En conjunto, esta tecnología ofrece una vía realista y prometedora para abordar de forma simultánea la captura, almacenamiento y reutilización de CO<sub>2</sub>, contribuyendo así a los objetivos de descarbonización y economía circular en entornos industriales intensivos en emisiones. El sistema integra la captura directa con la utilización del CO<sub>2</sub>, permitiendo su conversión durante la etapa de regeneración endotérmica del material catalítico, promoviendo así la producción selectiva de gas de síntesis [1, 2].



**Figura 1:** Esquema de la reactividad catalítica de la Tecnología CO<sub>2</sub>-SR.

El diseño de sistemas catalíticos bimetálicos no soportados, especialmente formulados ofrecen una funcionalidad dual: actuar, por un lado, como materiales adsorbentes capaces de almacenar  $\text{CO}_2$  a bajas temperaturas y, por otro, como catalizadores activos para transformar ese  $\text{CO}_2$  almacenado en productos de valor añadido —como el gas de síntesis ( $\text{CO} + \text{H}_2$ )— mediante su regeneración con metano. Los catalizadores se prepararon mediante un método de coprecipitación asistido por ultrasonido, empleando níquel (Ni) combinado con metales alcalinos y alcalinotérreos (Ba, K, Sr o Ca); al no requerir soporte por incorporación de sílice coloidal que mejora su dispersión y estabilidad estructural, lo que favorece tanto la captura como la reactividad del  $\text{CO}_2$ . Los materiales se caracterizaron a través de técnicas avanzadas como difracción de rayos X (DRX), espectroscopía infrarroja (FTIR), espectroscopía Raman y XPS, para entender en detalle su estructura, composición y comportamiento químico. A pesar de las temperaturas de operación elevadas, los materiales mantuvieron una estructura cristalina estable y presentaron superficies específicas elevadas ( $55\text{-}125\text{ m}^2/\text{g}$ ), claves para las etapas de adsorción y reacción.

El comportamiento catalítico se evaluó bajo condiciones cíclicas mediante pulsos alternos de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  en un reactor de lecho fijo, utilizando un sistema de detección en línea por espectrometría de masas. utilizando la Metodología de Respuesta Transitoria (TRM- *Transient Response Method*) (Figura 2). Este diseño experimental permitió simular la operación real de la tecnología  $\text{CO}_2$ -SR, en la que el catalizador alterna entre almacenar  $\text{CO}_2$  y regenerarse térmicamente transformándolo en gas de síntesis. De los materiales ensayados, el sistema NiBa mostró el mejor rendimiento y mayor estabilidad tras múltiples ciclos, alcanzando un comportamiento estacionario desde el tercer ciclo de operación.



**Figura 2:** Perfiles de concentración de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}$  durante ciclos alternos de regeneración de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  del catalizador NiBa.

Estos resultados confirman la viabilidad del enfoque  $\text{CO}_2$ -SR como una tecnología catalítica alternativa y eficiente para la captura y uso del carbono (CCU). Gracias a su naturaleza cíclica y a la funcionalidad integrada de los catalizadores, este proceso permite abordar simultáneamente dos grandes retos: almacenar  $\text{CO}_2$  de forma temporal y transformarlo en productos energéticos útiles, ofreciendo así una solución flexible, escalable y alineada con los objetivos de sostenibilidad y descarbonización industrial.

## Referencias.

- [1] Molina-Ramírez S. et al.,  $\text{CO}_2$ -SR Cyclic Technology:  $\text{CO}_2$  Storage and *in situ* Regeneration with  $\text{CH}_4$  over a new dual function NiBa unsupported catalyst. *Journal of  $\text{CO}_2$  Utilization*, 40 (2020) 101201.
- [2] S. Essounani Mérida et al., Influence of second metal incorporation on nickel-based unsupported catalysts for  $\text{CO}_2$  reduction ( $\text{CO}_2$ -SR) Technology. *Results in Engineering*, 26 (2025) 104921.

## Agradecimientos.

Los autores agradecen el apoyo financiero al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través del proyecto PID2021-124098OB-I00.