

Evaluación de cátodos de bajo costo para la producción de hidrógeno en celdas de electrólisis microbianas

Cardaña, René*; Varela, Luciana; Cabezas, Angela

Departamento de Sostenibilidad Ambiental, Instituto Tecnológico Centro Sur, Universidad Tecnológica (UTEC), Uruguay

* Corresponding author's: rene.cardena@utec.edu.uy

Introducción

Los sistemas bioelectroquímicos (BES, por sus siglas en inglés) son una plataforma tecnológica que integra procesos microbianos y electroquímicos para el tratamiento de aguas residuales y la conversión de sustratos orgánicos en productos de valor agregado. Estos sistemas aprovechan la capacidad de microorganismos electroactivos para transferir electrones hacia o desde electrodos, permitiendo el acoplamiento directo entre el metabolismo microbiano y un circuito eléctrico externo. Entre las distintas configuraciones de BES, las celdas de electrólisis microbianas (CEM) han cobrado particular relevancia debido a su potencial para generar hidrógeno a partir de materia orgánica mediante la aplicación de una diferencia de potencial externa moderada.

Las CEM funcionan en dos compartimientos separados por una membrana de intercambio iónico. En el ánodo, bacterias exoelectrogénicas oxidan la materia orgánica y liberan electrones que son transferidos al cátodo, donde inducen la reducción de protones u otros aceptores terminales, típicamente generando hidrógeno. Las CEM requieren un aporte externo de energía para superar el sobrepotencial de la reacción catódica, pero pueden alcanzar rendimientos energéticos significativos utilizando materiales idóneos.

En este contexto, uno de los principales desafíos es la selección de materiales que garanticen una operación eficiente, estable y económicamente viable. El platino ha demostrado una alta eficiencia catalítica para la evolución de hidrógeno (HER), pero su costo limita su escalabilidad. Por ello, se han explorado alternativas como espuma de níquel, acero inoxidable y materiales carbonosos dopados con metales de transición. El presente estudio propone el diseño, montaje y evaluación de CEM de bajo costo para la valorización de efluentes agroindustriales, utilizando materiales alternativos como cátodo (espuma de níquel y acero inoxidable).

Materiales y Métodos

Se utilizaron CEM de dos cámaras de acrílico con un volumen útil de 150 mL y un volumen de trabajo de 140 mL por cámara (anódica y catódica). En la cámara anódica se utilizó fieltro de grafito grado WDF como electrodo ánodo, con un área superficial de 17.5 cm² (2.5 x 2.5 cm). En la cámara catódica se utilizó espuma de níquel como cátodo con una pureza del 95 % de níquel y malla de acero inoxidable. La espuma de níquel poseía una dimensión de 4x4 cm y un grosor de 1.6 mm. El área superficial calculada fue de aproximadamente 34.6 cm² (área proyectada). La malla de acero inoxidable (malla 300, SS316) también fue de 4x4 cm. Ambas cámaras fueron separadas por una membrana de intercambio aniónico (AMI-7001, Membranes International). Las conexiones se realizaron con alambre de titanio (99 %) de 0.5 mm de diámetro.

Para la formación de la biopelícula electroactiva se usó lodo granular anaerobio proveniente de un reactor UASB (20 g/L-peso húmedo). El catolito fue una solución de NaCl (125 mM sin ajuste de pH). La cámara anódica utilizó como anolito una solución con la siguiente composición: 2.45 g/L NaH₂PO₄·H₂O, 4.58 g/L Na₂HPO₄, 0.31 g/L NH₄Cl, 0.13 g/L KCl, 12.5 mL de solución de oligoelementos y 5 mL de solución de vitaminas (Cheng et al., 2009). La fuente de carbono fue acetato de sodio trihidratado a una DQO inicial de 1.5 g/L. El pH del anolito se ajustó a pH 7.

Las actividades experimentales se llevaron a 30±1 °C con agitación de 150 rpm para ambas cámaras (anódica y catódica). Las pruebas bioelectroquímicas se realizaron

bajo el control de un potenciostato/galvanostato VSP Z-01 (BioLogic Science Instruments). El potencial de trabajo en el ánodo fue de 200 mV respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl (3.0 M NaCl, +210 mV vs SHE). El funcionamiento de las CEM se llevó a cabo en lotes, y al final de cada ciclo se sustituyó el anolito y el catolito. La fase de colonización se da por concluida cuando se observan curvas de densidad de corriente similares (3 ciclos mínimo) (Carmona-Martínez et al., 2015) retirando el inóculo.

Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos no revelan diferencias significativas en el desempeño electroquímico y energético de las CEM según el material del cátodo utilizado (Tabla 1). Se observa que la espuma de níquel mostró un rendimiento de 990 ± 94 mL H₂/g DQO, con una eficiencia coulombica del 81 %, y una eficiencia eléctrica del 92 %. En contraste, el cátodo de acero inoxidable presentó un rendimiento de hidrógeno de 1011 ± 85 mL H₂/g DQO, pero con una eficiencia eléctrica inferior (84%) a la espuma de níquel. Lo anterior indica una conversión más efectiva de la energía aplicada en hidrógeno útil, atribuible a un menor sobrepotencial de la reacción de evolución de hidrógeno (HER) en la superficie de níquel poroso (Guerrero-Sodric et al., 2024).

Tabla 1. Parámetros de desempeño de CEM de dos cámaras.

Cátodo	Y_{H_2} (mL H ₂ /g-DQO)	EC (%)	r_{cat} (%)	nE (%)	E_{cat} mV vs Ag/AgCl	ΔpH catolito
Espuma de níquel	990 ± 94	81 ± 7	84 ± 5	92 ± 5	1.46 ± 0.03	6.6 ± 0.4
Acero inoxidable	1011 ± 85	84 ± 4	84 ± 4	84 ± 3	1.53 ± 0.07	6.5 ± 0.4

La eficiencia coulombica (EC), fue levemente superior en el cátodo de acero inoxidable (84 ± 4 %) en relación con la espuma de níquel (81 ± 7 %). Sin embargo, ambos materiales mostraron igual recuperación catódica de hidrógeno (84%), lo que sugiere que las diferencias en la EC no se traducen necesariamente en pérdidas significativas en la etapa reductora, sino posiblemente en desviaciones hacia otras rutas metabólicas no electroactivas.

Conclusiones

Con base a los resultados obtenidos, el cátodo de espuma de níquel demostró un comportamiento electroquímico más eficiente y estable que el acero inoxidable en condiciones abióticas para producción de hidrógeno, especialmente en términos de eficiencia eléctrica. Aunque ambos materiales fueron capaces de generar volúmenes comparables de hidrógeno, el uso de níquel permitió un menor sobrepotencial.

Agradecimientos

Este proyecto es financiado por la ANII a través del Fondo María Viñas (FMV_3_2024_1_180447). Luciana Varela agradece a la Dirección de Investigación UTEC por la beca de maestría.

Referencias

- Carmona-Martínez, A. A., Trably, E., Milferstedt, K., Lacroix, R., Etcheverry, L., Bernet, N. (2015). Long-term continuous production of H₂ in a microbial electrolysis cell (MEC) treating saline wastewater. *Water research*, 81, 149-156. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.05.041>
- Cheng, K. (2009). Bioelectrochemical systems for energy recovery from wastewater (Doctoral dissertation, Murdoch University).
- Guerrero-Sodric, O., Baeza, J., Guisasola, A. (2024). Enhancing bioelectrochemical hydrogen production from industrial wastewater using Ni-foam cathodes in a microbial electrolysis cell pilot plant. *Water Research*, 256, 121616.