



Encuentro  
de JÓVENES  
INVESTIGADORES

## MEJORAMIENTO DE LA TRANSFERENCIA DE MASA EN REACTORES ELECTROQUÍMICOS POR APLICACIÓN DE ULTRASONIDO

**Uasuf Vega, Bernabé**

*Programa de Electroquímica Aplicada e Ingeniería Electroquímica- Facultad de Ingeniería Química- Universidad  
Nacional del Litoral*

Director: Bisang, José María

Codirector: Colli, Alejandro Nicolás

Área: Ingeniería

Palabras claves: Reactor electroquímico, Coeficiente de transferencia de materia,  
Ultrasonido

### INTRODUCCIÓN

La aplicación de ultrasonido en reactores electroquímicos es un problema recientemente estudiado dentro de la ingeniería electroquímica. Se ha informado (Pollet, B.G., 2012) que el uso de ultrasonido presenta los siguientes beneficios: (i) limpieza de la superficie del electrodo, (ii) mejoramiento de la cinética, (iii) facilita el desprendimiento de los gases formados en los electrodos, (iv) modifica la eficiencia y selectividad de las reacciones, (v) mejora la remoción de productos sólidos generados, y (vi) influye en las condiciones de transferencia de materia. Este último aspecto sólo ha sido investigado en reactores con electrodos de disco o cilindro rotatorio. En consecuencia, no existe información bibliográfica sobre el efecto del ultrasonido en reactores electroquímicos con electrodos planos paralelos, que son los equipos más frecuentemente usados en la práctica industrial. Esto genera un área de vacancia que fue abordada en forma experimental en esta Cientibeca.

### OBJETIVOS

Los objetivos de esta Cientibeca fueron:

- Evaluar la mejora del coeficiente global de transferencia de materia en reactores electroquímicos con electrodos planos paralelos al aplicar ultrasonido.
- Examinar la distribución del coeficiente local de transferencia de materia en la dirección axial del equipo.
- Determinar las condiciones óptimas de operación para el reactor electroquímico en presencia de ultrasonido.

Título del Proyecto: Evaluación experimental y teórica de reactores electroquímicos con condiciones hidrodinámicas mejoradas para el procesamiento de sistemas bifásicos (gas-líquido)

Instrumento: CAI+D, Proyecto: 50620190100002LI

Año convocatoria: 2020



## METODOLOGÍA

En primera instancia, se llevaron a cabo experimentos con una celda de 3 electrodos, empleando un electrodo de disco rotatorio, con el objetivo de trazar las curvas de polarización, bajo condiciones hidrodinámicamente controladas, del sistema ferricianuro-ferrocianuro (0,01 M) con carbonato de potasio (0,65 M) como electrolito soporte. Se empleó un barrido de potencial entre 0,25 y -1,5 V respecto a calomel saturado en KCl (SCE) con una velocidad de barrido del potencial de 5 mV/s. El electrodo de trabajo fue un disco de Ni de 3 mm de diámetro y un alambre de Pt de gran área se usó como contra electrodo. Se termostató a una temperatura de 30 °C y la velocidad angular del disco rotatorio se varió en el rango 500-3000 rpm. La concentración exacta de la solución fue determinada con un espectrofotómetro UV-VIS, marca Perkin-Elmer modelo Lambda 20, a una longitud de onda de 420 nm.

En segunda instancia, se realizaron experimentos en un reactor electroquímico de electrodos planos paralelos, configuración tipo filtro prensa, con cátodo segmentado y ánodo de acero inoxidable. El electrodo de trabajo constaba de 25 segmentos de Ni de 100 mm de ancho, 9,5 mm de longitud y 1 mm de espesor. Estos segmentos estaban eléctricamente aislados entre ellos por un espesor de 0,5 mm de resina epoxi. Cada segmento fue conectado en su parte trasera a un resistor de constantan con 0,6  $\Omega$  de resistencia, estando su otro extremo soldado al alimentador de corriente para este electrodo. El contra electrodo tenía las mismas dimensiones que el electrodo de trabajo (250 mm de longitud y 100 mm de ancho) con un espesor de 5 mm. Esta configuración garantiza ausencia de distribución de corriente primaria en el equipo. Se trabajó con tres espacios interelectrodos (1,8, 3,8 y 5,4 mm), fijado por el espesor de la junta de goma colocada entre ambos electrodos. El reactor fue intercalado en un circuito de recirculación de electrolito provisto de reservorio, bomba, caudalímetro y válvulas de control. Mayores detalles del equipo son informados por Colli y Bisang (2013). Se emplearon 2 transductores de ultrasonido, cada uno con una potencia de 50 W y 40 kHz de frecuencia. La potencia disipada en el medio, medida calorimétricamente, fue 20,9 W. Los transductores fueron sujetos por vástagos roscados a la parte externa del contra electrodo, estaban simétricamente ubicados sobre su eje central vertical a 50 mm del extremo inferior y con una separación de 100 mm. Los experimentos se realizaron en condición potencioestática, controlando la temperatura a 30 °C y cambiando el caudal del electrolito en el rango 2-10 dm<sup>3</sup>/min. En el sistema monofásico se empleó la reducción de ferricianuro como reacción test, mientras que para los experimentos bifásicos se usó la generación de oxígeno desde soluciones diluidas alcalinas con perclorato de sodio como electrolito soporte. En este último caso la concentración del reactivo se determinó por volumetría ácido-base usando fenolftaleína como indicador.

## RESULTADOS

La Fig. 1 muestra una curva de polarización típica para la reducción de ferricianuro obtenida con el electrodo de disco rotatorio. Puede observarse una amplia región de potenciales en donde la reacción tiene lugar en condiciones de corriente límite, permitiendo adoptar un rango de potencial entre -0,1—0,4 V para la realización de los experimentos con el reactor con electrodos planos paralelos. El procesamiento de la corriente límite en función de la velocidad angular de acuerdo al método de Levich permitió obtener  $8,1 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s para el coeficiente de difusión del ión ferricianuro. Un estudio análogo para la generación de oxígeno como reacción test permitió definir un rango de potencial entre 0,9-1,2 V para los experimentos bifásicos.

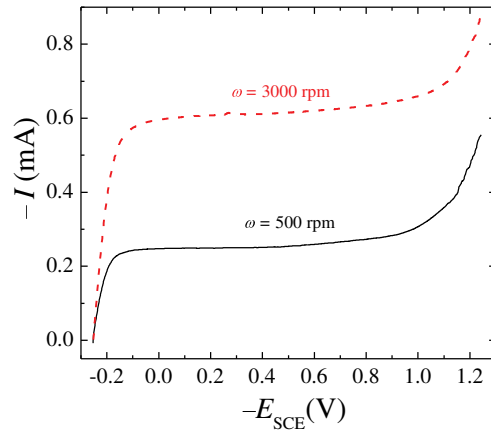


Figura 1. Curva de polarización para la reducción de ferricianuro paramétrica en velocidad angular ( $\omega$ ).

La Fig. 2 muestra una curva típica para la distribución axial del coeficiente local de transferencia de materia obtenida a un caudal de  $3,6 \text{ dm}^3/\text{min}$  para un espacio interelectrodo de  $1,8 \text{ mm}$  operando con y sin la aplicación de ultrasonido (círculos rojos y cuadrados negros, respectivamente). La línea llena representa la predicción teórica para flujo laminar desarrollado. Puede observarse que en condición silenciosa se reproduce el comportamiento teórico esperado pero al aplicar ultrasonido los coeficientes se incrementan apreciablemente.

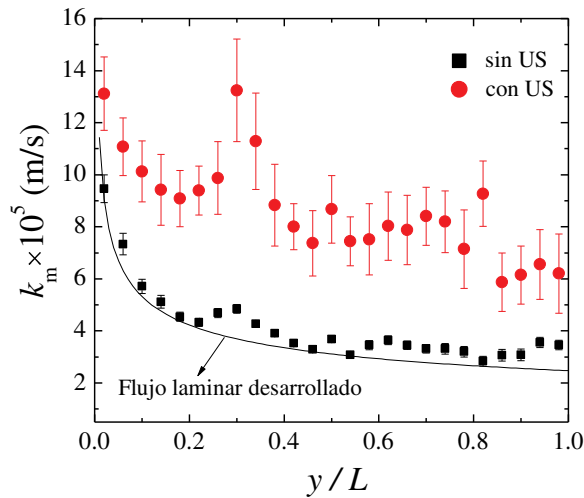


Figura 2. Distribución del coeficiente local de transferencia de materia en función de la posición. Sistema bifásico. Caudal:  $3,6 \text{ dm}^3/\text{min}$ , Espacio interelectrodo:  $1,8 \text{ mm}$ . Segmentos: desviación standard.

La parte inferior de la Fig. 3 sintetiza, para el sistema monofásico, el coeficiente de transferencia de materia global ( $k_{m, \text{global}}$ ) en función de la velocidad de flujo sin y con aplicación de ultrasonido. La parte superior de esta figura informa la desviación relativa media ( $\delta$ ) con el fin de caracterizar en forma estadística la variación del coeficiente local en sentido axial. El coeficiente global y la desviación relativa media fueron evaluados con las ecuaciones siguientes, respectivamente.

$$k_{m, \text{global}} = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} k_{m, i} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} \frac{|k_{m, \text{global}} - k_{m, i}|}{k_{m, \text{global}}} \quad (2)$$

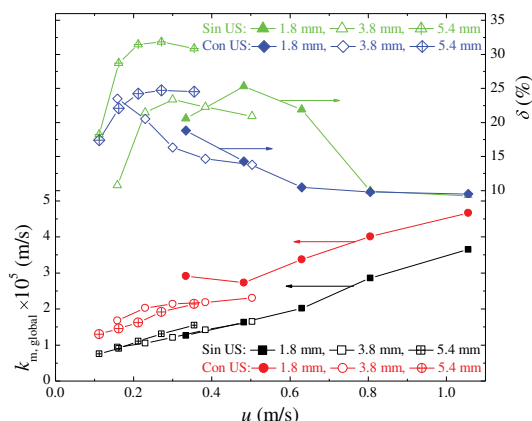


Figura 3. Coeficiente global de transferencia de materia y desviación relativa media en función de la velocidad superficial de flujo en sistema monofásico para distintos espacios interelectrodo.

La Fig. 3 pone en evidencia el importante efecto que tiene la aplicación de ultrasonido para el aumento del coeficiente global de transferencia de materia y para la uniformización de su valor local en reactores electroquímicos con electrodos planos paralelos. Mayores detalles tanto en los valores determinados experimentalmente como en las predicciones teóricas son informados por Colli y col. (2023).

### CONCLUSIONES

Se puede concluir que el coeficiente global de transferencia de materia mejora al aplicar ultrasonido a un reactor con electrodos planos paralelos en un factor que va desde 1,1 a 2,3. A su vez, se observó que este incremento con aplicación de ultrasonido es mayor para pequeños valores de espacio interelectrodo y bajos caudales, siendo el efecto más marcado en el sistema bifásico. Asimismo, la aplicación de ultrasonido vuelve más uniforme a la distribución del coeficiente local de transferencia de materia a lo largo de la posición axial del reactor. Se observó que la desviación relativa media bajo aplicación de ultrasonido podía ser mejorada en un 50 % con relación al mismo valor en condición silenciosa. Además, se corroboró que existe una fuerte dependencia de la distribución del coeficiente de transferencia de materia con la velocidad de flujo superficial. Finalmente, se puede establecer que la aplicación de ultrasonido en reactores con electrodos planos paralelos representa una alternativa promisoriosa para incrementar el desempeño de estos dispositivos, lo cual constituye un importante avance en el desarrollo de este tipo de equipos.

### BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

**Colli A.N. y Bisang, J.M., 2013.** Validation of theory with experiments for local mass transfer at parallel plate electrodes under laminar flow conditions. *J. Electrochem. Soc.* **160** (1), E5–E11.

**Colli, A.N., Uasuf Vega, B.J., y Bisang, J.M., 2023.** Mass-transfer studies in a parallel-plate electrochemical reactor with ultrasonic assistance under single-phase and two-phase (gas-evolving) flows. *J. Electroanal. Chem.* **928** (1), 117011.

**Pollet, B.G., 2012.** Power ultrasound in electrochemistry. John Wiley & Sons. Reino Unido.