

Desinfección del agua a través de métodos electroquímicos

Sarai Velazquez Peña*

Recepción: 15 de abril de 2016
Aceptación: 29 de agosto de 2016

*Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Lerma, México.

Correo electrónico: s.velazquez@correo.ler.uam.mx

Se agradecen los comentarios de los árbitros de la revista y al Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México por las facilidades otorgadas.



Resumen. Se tiene como objetivo centrarse en la propuesta metodológica que lleva a cabo la electrosíntesis de peroxocarbonatos, la cual emplea electrodos de diamante dopados con boro (DDB) y utiliza como materias primas soluciones de carbonato de sodio y bicarbonato de sodio y carbonato/ácido acético. Las variables de estudio se enfocaron en la influencia del pH, densidad de corriente y concentración de las soluciones durante el proceso. Los resultados obtenidos mostraron una estrecha relación entre la influencia anódica del proceso favorecida en medios alcalinos y la presencia de especies oxil asociados en la formación de peroxocarbonatos, que emplearon bajas densidades de corriente eléctrica con una eficiencia de producción alrededor de 80% en tiempos cortos de operación (5 h).

Palabras clave: desinfección, oxidantes, diamante dopado con boro, electrosíntesis.

Water Disinfection by Electrochemical Methods

Abstract. The aim of this work is to focus on the methodological proposal that the electrosynthesis of peroxocarbonates carries out, which uses boron-doped diamond electrodes (BDD) and uses solutions of sodium carbonate, sodium bicarbonate and acetic acid as raw materials. The use of different carbonate raw materials and the effect of several operation parameters as current density and pH were evaluated in order to let the electrosynthesis of peroxocarbonates occurred. The results obtained showed a close relationship between anodic influence favoured in alkaline medium and the presence of oxyl species associated with the formation of peroxocarbonates which employed low current densities with an 80% efficiency production at a short time (5h).

Keywords: disinfection, oxidants, boron-doped diamond, electrosynthesis.

Introducción

En las últimas décadas se ha acentuado la importancia de idear y aplicar métodos que optimicen el uso y distribución del agua. Se necesita promover el consumo sustentable que asegure a largo plazo que el agua seguirá siendo un recurso renovable. Gracias a esto, las técnicas de purificación que permiten reutilizarla o hasta potabilizarla han adquirido cada vez más mayor relevancia.

El problema de la contaminación del agua en el mundo y en especial en nuestro país representa un importante desafío a nivel global. Por tanto, es imprescindible promover el tratamiento adecuado de los contaminantes presentes en las descargas mediante tecnologías sustentables y con un

mínimo impacto ambiental, que a su vez generen valor agregado al proceso.

Los procesos de desinfección se han empleado con la finalidad de destruir o inactivar organismos patógenos. En el caso del cloro, es el desinfectante más usado para el tratamiento de aguas residuales porque destruye los organismos que se pretenden inactivar mediante la oxidación del material celular; sin embargo, a pesar del bajo costo de operación y la sencilla dosificación de este elemento como desinfectante, en el momento que se aplica exhibe severas desventajas, ya que en presencia de compuestos nitrogenados promueve la formación de cloroaminas, o bien en combinación con compuestos orgánicos se origina la formación de trihalometanos y trihalogenados, compuestos sumamente

peligrosos y tóxicos. Otras alternativas para desinfectar son la ozonización y la desinfección con radiación ultravioleta. No obstante, aplicar estas técnicas comprende tiempos de tratamiento largos, baja eficiencia de operación y elevados costos de mantenimiento.

Por tal motivo, el objetivo se basa en la propuesta metodológica para llevar a cabo la síntesis *in situ* de un compuesto químico ambientalmente compatible, como es el caso de los percarbonatos también conocidos como peroxocarbonatos mediante métodos electroquímicos empleando electrodos de diamante dopados con boro (DDB) para su aplicación cuando se desinfectan aguas residuales.

Los peroxocarbonatos son compuestos que poseen una gran cantidad de aplicaciones. Destaca su uso como agentes blanqueantes, desinfectantes y oxidantes de materia orgánica, así como los productos que se generan como consecuencia de su empleo. Son de muy sencillo tratamiento desde el punto de vista medioambiental; sin embargo, los métodos de síntesis, son poco eficaces, por lo que se ha buscado la implementación de nuevas tecnologías como es el caso de los métodos electroquímicos (Schmalz *et al.*, 2009; Cañizares *et al.*, 2009; Raffellini *et al.*, 2011; Velazquez-Peña *et al.*, 2013; Saha *et al.*, 2004). Los métodos electroquímicos se caracterizan por poseer una amplia compatibilidad ambiental, sencilla operación, alta eficiencia y bajo costo respecto a otras tecnologías y procesos convencionales en la producción de oxidantes, pues el principal precursor empleado es el electrón, considerado como un reactivo limpio, ya que evita el uso de otros compuestos químicos que por sí mismos pueden ser tóxicos o peligrosos (Panizza y Cerisola, 2005).

1. Metodología

1. 1. Condiciones para la síntesis de oxidantes

Los estudios sobre la electrosíntesis de oxidantes se llevaron a cabo en una instalación a escala piloto con modo de funcionamiento discontinuo. Se emplearon como muestra de estudio soluciones sintéticas de carbonato, bicarbonato de sodio y bicarbonato/ácido acético con concentraciones 0.5 M y 1 M.

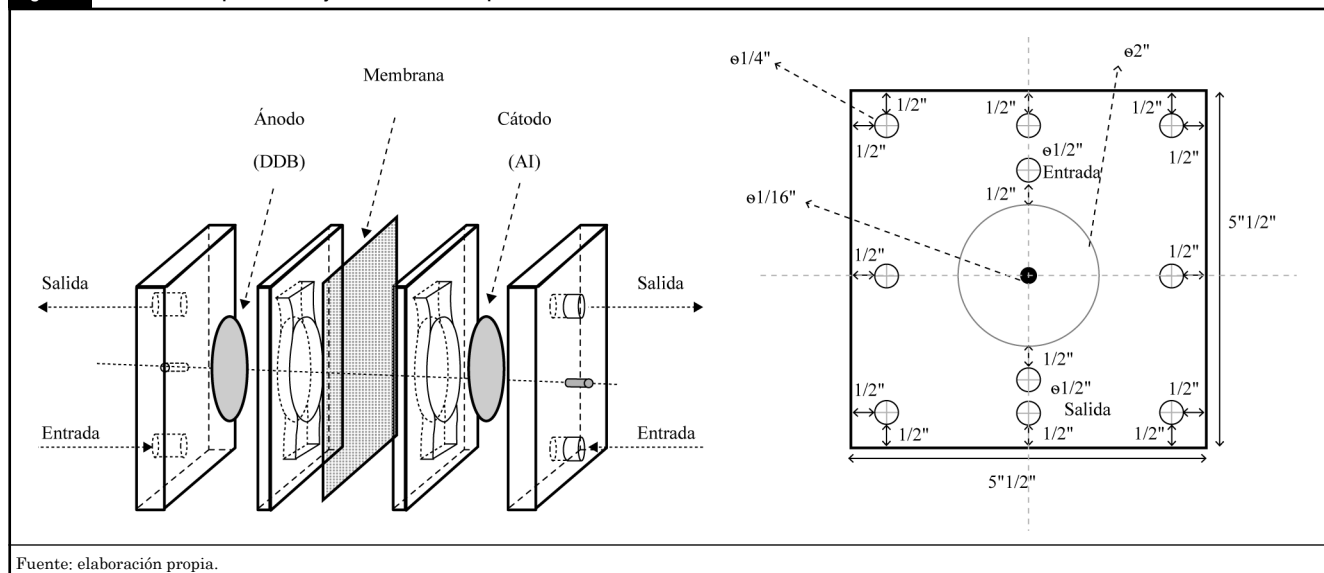
Al inicio de cada experimento cada una de las soluciones de estudio se introdujo en contenedores tipo ciclón y de ahí, mediante una bomba, se impulsó hacia el reactor electroquímico, cuyos electrodos están conectados a las terminales de la fuente de alimentación. Posteriormente, pasan a través de un refrigerante para mantener una temperatura de operación en un rango de 5-25 °C, considerado óptimo para la formación de oxidantes (Alsheyab *et al.*, 2009). En este trabajo se empleó un reactor electroquímico de flujo axial de doble compartimento (figura 1).

Para efectuar la reacción de síntesis de peroxocarbonatos por medio de tecnologías electroquímicas, cada una de las soluciones sintéticas a partir de carbonato, bicarbonato de sodio y bicarbonato/ácido acético se recircularon sucesivamente a un reactor electroquímico permitiéndose la separación de los gases generados durante el proceso.

1. 2. Diseño reactor electroquímico

El reactor electroquímico ha sido diseñado en una escala de proporción 1:0.5 respecto a reactores electroquímicos comerciales de flujo axial. El material empleado para su elaboración fue un polímero de ingeniería conocido como Nylamid, cuya composición está soportada en *nylon* y permite

Figura 1. Reactor electroquímico de flujo axial de doble compartimento.



su uso como un material que sustituye el empleo de metales en la elaboración de piezas industriales. Dentro de las propiedades que caracterizan a este polímero se encuentran: *a*) bajo coeficiente de fricción, *b*) resistencia a la abrasión, *c*) alta resistencia mecánica, *d*) pesa de 2 a 8 veces menos respecto a los metales que sustituye y resistencia al desgaste (DOF, 1993). Las dimensiones del dispositivo de 13×13 cm lo hace viable en versatilidad y sencilla operación en laboratorio.

Como material anódico se emplearon recubrimientos de diamante dopado con boro (DDB) y como material catódico acero inoxidable AISI 304, asimismo se realizaron experimentos con la configuración electroquímica DDB-DDB. Los compartimentos fueron separados mediante una membrana catiónica compuesta de un polímero perfluorado con grupos ácido sulfónico (PFSA). Este polímero se caracteriza por su alta conductividad iónica (0.9-0.02 meq/g), baja conductividad de electrones ($8 \cdot 10^{-2}$ S/cm), permeabilidad al H_2 ($1 \cdot 10^{-16} m^3 \cdot m / m^2 \cdot S \cdot Pa$) con un grosor de $180 \mu m$. La membrana se conserva en agua desionizada para mantener la condiciones de maleabilidad. Para el control del pH en un rango de 10.5-11.8 se empleó una disolución de NaOH 10 M que fue incorporada directamente en el compartimento anódico. Como fuente de alimentación, se utilizó una fuente de poder GW Instek modelo GPR-1820HD con densidades de corriente eléctrica correspondientes a un rango de 650-1300 Am⁻².

1. 3. Determinación global de oxidantes

Para la determinación de la concentración global de oxidantes, se llevó a cabo un ensayo I-/I₂. Mediante este método se consigue cuantificar todas las especies oxidantes presentes en la disolución, ya que oxidan el ion yoduro hasta yodo molecular. El ensayo consiste en adicionar a una muestra de 10 mL tomada del compartimento anódico una disolución de H₂SO₄ al 25% debido a que la reacción es favorecida en medio ácido y KI sólido en exceso. Posteriormente, se valora el yodo generado con tiosulfato de sodio 0.01 M, que emplea una disolución de almidón como indicador para la titulación.

2. Resultados y discusión

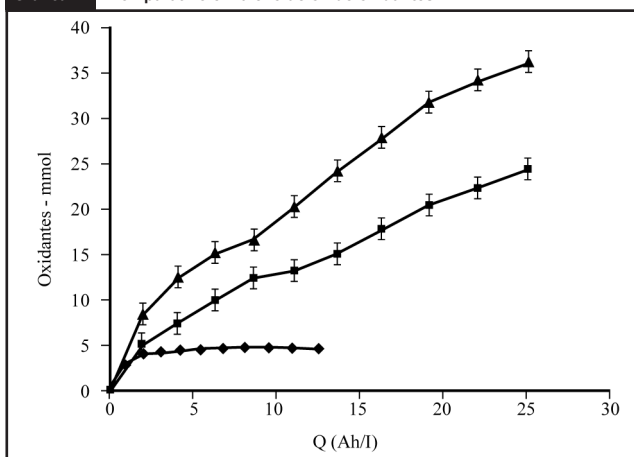
A través de la metodología propuesta mediante el empleo de electrodos de diamante dopados con boro (DDB) para llevar a cabo la síntesis electroquímica de nuevos compuestos químicos como los peroxocarbonatos, se evaluaron las diferentes variables que influyen en el proceso de electrosíntesis como la influencia del uso de diferentes materias primas (carbonato de sodio, bicarbonato de sodio, bicarbonato de sodio/ ácido acético), efecto de la densidad de corriente eléctrica y pH.

Los resultados obtenidos reflejan una amplia influencia anódica durante el proceso electroquímico estudiado debido a

la elevada tasa de producción de especies oxil que pueden ser asociados con la formación de peroxocarbonatos favorecidos bajo condiciones de operación a pH alcalinos en un rango de operación comprendido de 10.5–11.8, y bajas densidades de corriente eléctrica correspondientes de 650 hasta 1300 Am⁻². Estudios previos durante el proceso de síntesis electroquímica de compuestos oxidantes, tales como los ferratos y cloratos exhiben elevados rangos de operación en relación con la densidad de corriente durante el proceso sobre electrodos de DDB. De esta manera, el empleo de elevadas densidades de corriente eléctrica no garantizan un incremento de radicales libres en el medio que promuevan la formación *in situ* y la formación directa sobre la superficie anódica del oxidante de estudio (Alsheyab *et al.*, 2009; Suffredini *et al.*, 2004; Hou *et al.*, 2009).

De acuerdo con el tipo de materia prima y las concertaciones evaluadas, 0.5–1.0 M, durante el proceso fue posible identificar la influencia inversamente proporcional en relación con el aumento de la concentración de la materia prima y la disminución de la eficiencia de producción de peroxocarbonatos. Lo anterior se ocasionó por el efecto de la solubilidad en el medio que saturó de forma inmediata las superficies de los electrodos durante el proceso de electrólisis y provocó un decaimiento del rendimiento del sistema por debajo de 50% de producción; en este caso se empleó el bicarbonato de sodio como la materia prima óptima (0.5 M) durante la síntesis de peroxocarbonatos con una tasa de eficiencia de 80%. Así pues, las concentraciones 1 M tanto para carbonato y bicarbonato de sodio fueron descartadas. Por otro lado, debido al fenómeno desarrollado por efecto de la solubilidad sobre el medio y la eficiencia del sistema bicarbonato de sodio, se evaluó el comportamiento del uso de ácido acético en combinación con bicarbonato de sodio 1 M. En la gráfica 1 se muestra

Gráfica 1. Comparativo en la evolución de oxidantes.



Nota: el comparativo se realizó a partir de ■ Na₂CO₃, ▲ NaHCO₃ 0.5 M y ◆ NaHCO₃ 1 M / CH₃-COOH. Densidad de corriente eléctrica 650-1300 Am⁻² que empleó una configuración DDB-DDB.

Fuente: elaboración propia.

el comportamiento de la evolución de oxidantes donde se emplearon las materias primas descritas.

2. 1. Electrosíntesis de peroxocarbonatos: carbonato de sodio y bicarbonato de sodio como materias primas

Las gráficas 2a), 2b) y 2c) muestran los resultados obtenidos durante la electrosíntesis de soluciones de carbonato y bicarbonato de sodio con concentraciones 0.5 M bajo una configuración de electrodos DDB-Acero. Es posible determinar que la producción de oxidantes fue más efectiva al emplear bajas densidades de corriente tanto para el sistema carbonato y como para el de bicarbonato de sodio; en ambos casos, la zona de densidad de corriente fue cercana a los 650 Am⁻², la cual favorece la formación crucial del incremento de producción electrolítica de peroxocarbonatos, como se puede observar en las gráficas 2a) y 2b).

Por otra parte, la evolución correspondiente a la concentración de peroxocarbonatos aumenta de modo progresivo durante todo el proceso hasta llegar a un intervalo en el que se mantiene constante aproximadamente. Esta zona de concentración constante durante la producción de peroxocarbonatos podría atribuirse a un proceso simultáneo de generación de oxidantes en el medio y la reducción de los oxidantes ya formados, ocasionado por la ausencia de iones carbonatos libres en el medio durante la electrosíntesis del producto esperado.

Es posible observar también que el empleo de soluciones de bicarbonato en comparación con carbonato de sodio 0.5 M, de acuerdo con la concentración de especies de carbonatos libres en el medio, favorece la producción de oxidantes, con base en el diagrama de distribución de especies de las gráficas 3a) y 3b). La influencia del pH alcalino permite incrementar la producción de los oxidantes esperados debido a que el

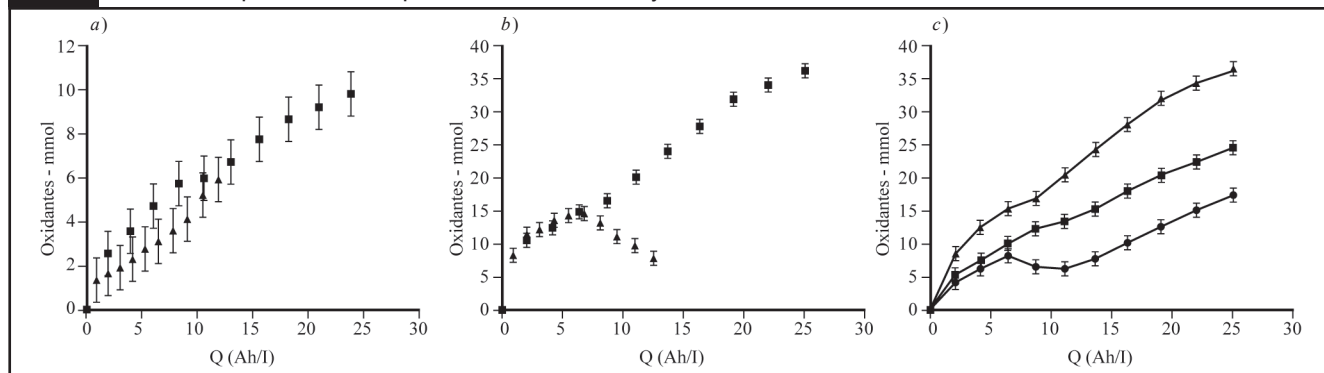
proceso de síntesis es casi en su totalidad un mecanismo que se desarrolla sobre la superficie anódica y evita la formación de procesos paralelos que puedan inhibir la electrogeneración de oxidantes. De esta manera, el espectro alcalino durante la síntesis contribuye a disminuir las especies que puedan inhibir la eficiencia del sistema.

Al respecto, dentro del proceso se lleva a cabo un efecto significativo en relación con los carbonatos libres en el medio durante la electrosíntesis de peroxocarbonatos. Se emplea bicarbonato de sodio como materia prima en comparación con el carbonato de sodio debido a que existe una correlación entre el factor de actividad química y el efecto del pH. Con base en este hecho, el factor de actividad química correspondiente al sistema carbonato de sodio es del orden de 5.205 y para el sistema bicarbonato de sodio le corresponde un valor de 8.085.

Lo anterior permitió corroborar la eficiencia del sistema bicarbonato de sodio durante el proceso de síntesis electroquímica de peroxocarbonatos sobre el sistema carbonato de sodio. Entre mayor sea el factor de actividad de un sistema, se incrementa su velocidad de reacción garantizando dentro del intervalo alcalino de operación una interacción química eficiente sobre la concentración de los iones carbonatos libres en el medio que permiten el incremento de la evolución del oxidante en estudio.

En otro aspecto, al ser evaluadas las mismas condiciones de operación para el sistema carbonato y bicarbonato de sodio bajo la configuración de electrodos DDB-DDB, los resultados obtenidos reflejan una disminución en la eficiencia del sistema por debajo de 50% respecto DDB-acero. Sin embargo, nuevamente es favorable la producción de peroxocarbonatos en el sistema bicarbonato y se demuestra la viabilidad de la metodología propuesta para su uso en la síntesis de estos compuestos. En cuanto a la influencia del comportamiento de pH durante el proceso, éste se ve favorecido por un medio alcalino en su totalidad sin fluctuaciones. El bajo rendimiento

Gráfica 2. Electrosíntesis de peroxocarbonatos empleando soluciones de carbonato y bicarbonato de sodio 0.5 M usando DDB-Acero.



Nota: a) oxidantes totales a partir de Na₂CO₃, b) oxidantes totales a partir de NaHCO₃. Densidad de corriente eléctrica 650-1300Am⁻²: ■ 650 Am⁻², ▲ 1300 Am⁻², c) comparativo en la evolución de oxidantes a partir de ■ Na₂CO₃, ▲ NaHCO₃, ● diferencia.
Fuente: elaboración propia.

de la síntesis de peroxocarbonatos puede ser atribuido a un proceso simultáneo de oxidación y reducción del medio que impide la evolución de concentraciones considerables y factibles de peroxocarbonatos.

2. 2. Electrosíntesis de peroxocarbonatos: bicarbonato de sodio/ácido acético como materias primas

Una vez establecidas las condiciones favorables de operación como la materia prima, pH y densidad de corriente eléctrica para la electrogeneración de peroxocarbonatos con concentraciones de materias primas 0.5 M, se evaluó la influencia de ácido acético como agente *buffer* resistente a los cambios de pH durante la electrosíntesis de peroxocarbonatos y al mismo tiempo como un agente de solubilidad para concentraciones 1 M de bicarbonato de sodio. Este hecho obedece a que el ácido acético, por su naturaleza de ácido débil, permite su aplicación. Bajo estas condiciones puede considerarse que la influencia de pH alcalino constante en el medio contribuya a la formación de concentraciones constantes de carbonatos libres que permitan con facilidad la electrogeneración de los oxidantes esperados. A pesar de esto, durante el proceso de electrosíntesis, la producción neta de oxidantes fue menor en comparación con el sistema óptimo bicarbonato de sodio debido a cambios elevados de temperatura correspondiente a 70 °C durante el proceso y a la formación de un pequeño precipitado, que es depositado en la superficie de los electrodos promoviendo la pasivación

de los mismos. Por tal motivo, se descarta la posibilidad de emplear la fuente protónica del ácido acético como un agente que promueva la solubilidad de concentraciones elevadas de materia prima.

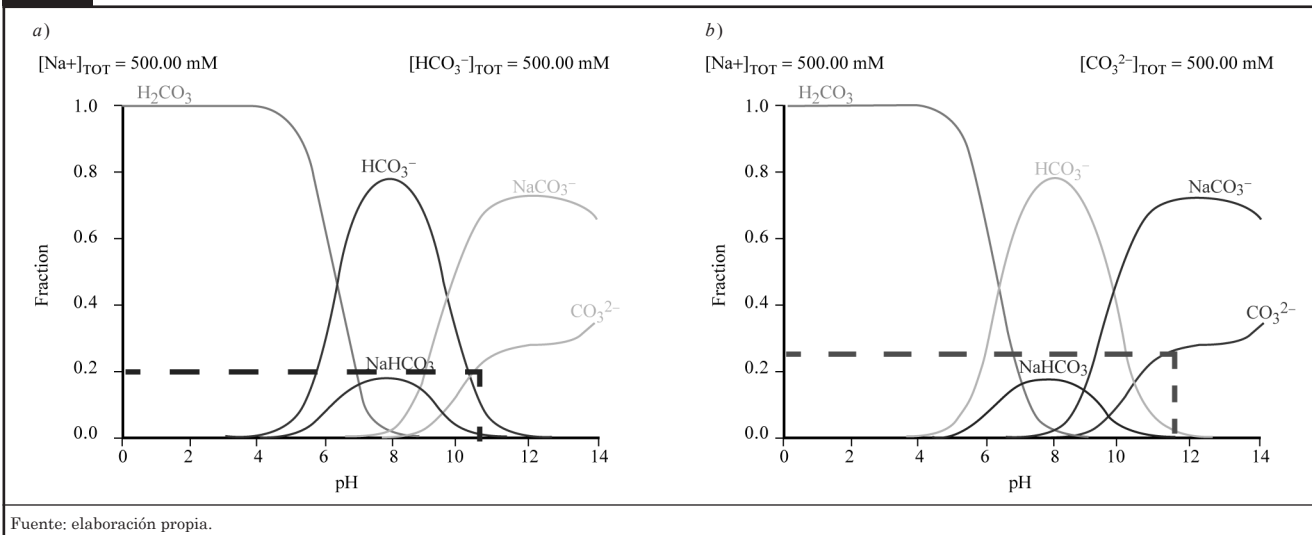
Ahora bien, se destaca que causa del aumento de la temperatura, la concentración de oxidantes electrogenerados sean peroxocarbonatos. En el siguiente apartado se describe el efecto de la temperatura para la formación de oxidantes. En la tabla 1 se muestra un resumen de las concentraciones máximas obtenidas durante el proceso de electrogeneración de oxidantes mediante la metodología propuesta a través de las diferentes materias primas de estudio y configuraciones electroquímicas. Resultó el sistema más eficiente el que corresponde a la configuración DDB-acero, y empleó bicarbonato de sodio 0.5 M en un tiempo de síntesis alrededor de 5 h con una tasa de electrogeneración de peroxocarbonatos del orden de 36.5 mmol de oxidantes.

Tabla 1. Evolución de oxidantes a través de configuraciones electroquímicas DDB-acero, DDB-DDB y materias primas: carbonato o bicarbonato de sodio, bicarbonato de sodio / ácido acético.

Materia prima	Configuración electroquímica	Tiempo (h)	mmol oxidantes
Carbonato de sodio [1 M]	DDB/acero	5	Pasivación
	DDB/DDB	3	Concentraciones menores a 1mmol
Bicarbonato de sodio [1 M]	DDB/acero	5	Pasivación
	DDB/DDB	4.5	Concentraciones menores a 1 mmol
Carbonato de sodio [0.5 M]	DDB/acero	5	20.3
	DDB/DDB	3	1.4
Bicarbonato de sodio [0.5 M]	DDB/acero	5	36.5
	DDB/DDB	4.5	2.5
Bicarbonato de sodio [1 M] / ácido acético	DDB/acero	3.5	4.8

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 3. Influencia del pH durante el proceso de síntesis de peroxocarbonatos durante la electrólisis de Na₂CO₃ y NaHCO₃.



3. Efecto de la temperatura

Bajo las condiciones óptimas de operación para el sistema bicarbonato de sodio, es significativo destacar la importancia que posee el efecto de la temperatura en relación con el efecto de solubilidad permanente de la materia prima en el medio, así como en la formación de los radicales hidroxilo que favorecen las posibles reacciones indirectas en la formación de los oxidantes esperados beneficiados con un incremento de temperatura durante el transcurso de operación a partir de un *set-point* de trabajo de 5 °C hasta un intervalo de temperatura que alcanza los 20 °C. Después de alcanzar este rango se observó que a mayores temperaturas decrece la eficiencia del sistema que puede ser atribuido a la degradación de los oxidantes generados.

Sin embargo, en el sistema bicarbonato de sodio/ácido acético se produce un aumento considerable de la temperatura de operación (35-50 °C) en un tiempo de 2 hasta 5 min, que probablemente favorezca la solubilidad durante el proceso de reacción mientras que la eficiencia del sistema se ve disminuida debido a la acelerada descomposición de los radicales que pueden favorecer la síntesis indirecta de los oxidantes. Por otra parte, cabe resaltar que en relación con las temperaturas de operación empleadas se puede garantizar que el producto obtenido después de la metodología empleada podría descartar la presencia de peróxido de hidrógeno y ozono, ya que bajo los rangos de temperatura de operación empleados su degradación es casi inmediata y podría atribuirse la presencia de peroxocarbonatos en el medio (Panizza y Cerisola 2005; Schmalz *et al.*, 2009).

4. Determinación de la constante de velocidad en la síntesis de peroxocarbonatos

Las soluciones de carbonatos utilizados como materia prima, carbonato de sodio y bicarbonato 0.5 M empleando una configuración DDB-acero mediante la metodología

Tabla 2. Constantes cinéticas de reacción en la electrogeneración de peroxocarbonatos al emplear sistema DDB-acero, materias primas: carbonato y bicarbonato de sodio 0.5 M.

Sistema	Primer orden		Segundo orden	
	K_1 min^{-1}	R^2	K_2 $L\ mg^{-1}\ min^{-1}$	R^2
Acero-DDB [0.5 M] Bicarbonato de sodio	0.1652	0.9948	0.0156	0.8483
Acero-DDB [0.5 M] Carbonato sodio	0.0321	0.9954	0.0072	0.8712

Fuente: elaboración propia.

propuesta para llevar a cabo la síntesis de peroxocarbonatos, contribuyen a la formación de un grupo peróxido que podría estar asociado con la síntesis del oxidante esperado. Es importante destacar que el efecto de la actividad química es una respuesta adecuada durante la producción de los oxidantes de estudio en el sistema debido a que se garantiza una respuesta de alta actividad química favoreciendo una mayor velocidad de reacción durante el proceso de electrosíntesis. Los datos experimentales generados del proceso de electrosíntesis de peroxocarbonatos para el sistema carbonato y bicarbonato de sodio se ajustan a una cinética de reacción de primer orden, en donde, como se describió, el sistema bicarbonato de sodio es el que tiene la tendencia a una producción de oxidantes con mayor eficiencia. La constante de velocidad de la producción de oxidantes corresponde a $0.1652\ min^{-1}$ vs. $0.0321\ min^{-1}$ para carbonato de sodio (tabla 2).

Análisis prospectivo

Hoy en día el detrimento de la calidad del agua es un tema de interés para el desarrollo urbano, así como para el mantenimiento y bienestar de la vida en el planeta. Particularmente, en nuestro país, por medio de las diversas actividades antrópicas, se ha llevado a cabo la disminución de la calidad del agua a causa de la descarga incontrolada de un sinnúmero de contaminantes, entre los que destaca la presencia de metales pesados, compuestos recalcitrantes y microorganismos patógenos.

En específico, la inactivación de microorganismos patógenos presentes en el agua es de principal interés para llevar cabo su potabilización y así garantizar la calidad para uso y consumo humano. Es por ese motivo que resulta de gran interés innovar y consolidar nuevas tecnologías en materia de desinfección de agua mediante procesos eficientes y amigables con el ambiente, y así asegurar la salud pública a través del acceso hacia recursos hídricos aptos para el consumo.

Aunado a lo anterior, este artículo tiene por eje central la síntesis de nuevos compuestos oxidantes que pueden ser empleados en el proceso de desinfección de agua. La tecnología propuesta se basa más que nada en el empleo de métodos electroquímicos que utiliza como material de electrodo diamante dopado con boro (DDB). Dentro de este proceso, el principal reactivo es el electrón, que es considerado un agente ambientalmente compatible y con el que se prescinde la adición de otros compuestos químicos para que la reacción se lleve a cabo.

De esta manera, se pretende desde el enfoque ambiental fomentar la sustentabilidad, mientras que desde el punto de vista del desarrollo humano se promueve como garantía

principal la salud pública. Respecto a la economía y desarrollo industrial, se tiene una rentabilidad superior a 80% en relación con las tecnologías convencionales, que es viable para su aplicabilidad en escala piloto.

Conclusiones

La metodología que se propuso mediante el empleo de electrodos de DDB-acero puede ser utilizada con éxito para promover la síntesis de oxidantes a partir de soluciones de bicarbonato. De acuerdo con los resultados obtenidos, las mejores condiciones de operación para llevar a cabo el proceso de electrosíntesis fueron a partir del sistema bicarbonato de sodio 0.5 M, bajas densidades de corriente eléctrica 650 Am^{-2} , pH alcalino y el efecto del factor de actividad química de las especies de carbonatos libres en solución que favorece la viabilidad del empleo de DDB como material

anódico durante la síntesis. Con los resultados obtenidos se calculó una eficiencia correspondiente a 80% durante el proceso en el sistema bicarbonato de sodio con un 30% de ventaja respecto al sistema carbonato de sodio. Sin embargo, es necesario reforzar la eficacia del proceso mediante la evaluación de las posibles limitaciones en cuanto a la transferencia de masa y en la estabilidad del oxidante electrogenerado. Asimismo, las condiciones óptimas de trabajo fueron aplicadas para el sistema bicarbonato/ácido acético; se obtuvo en menor proporción la evolución de peroxocarbonato. A pesar de esto, se descarta la posibilidad de formación de otras especies oxidantes como el peróxido de hidrógeno y ozono debido al aumento incontrolado de temperatura que se presenta durante la reacción. Por otro lado, la estabilidad de los oxidantes electrogenerados a partir de las condiciones óptimas establecidas es viable para su aplicación durante el proceso de desinfección de agua.



Referencias

- Alsheyab, M., Jiang, Q. y Stanford, C. (2009). On-line production of ferrate with an electrochemical method and its potential application for wastewater treatment-A review. *Journal of Environmental Management*, 90(3), 1350-1356.
- Cañizares, P., Paz, R., Sáez, C. y Rodrigo, M. A. (2009). Electrochemical oxidation of alcohols and carboxylic acids with diamond anodes a comparison with other advanced oxidation processes. *Electrochimica Acta*, 53(5), 2144-2153.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (1993). NMX-E-202-1993-SCFI "Industria del plástico-Poliamida 6/12-Especificaciones".
- Hou, Y., Jiuhui, Q., Xu, Z. y Huijuan, L. (2009). Electrochemical incineration of dimethyl phthalate by anodic oxidation with boron-doped diamond electrode. *Journal of Environmental Sciences*, 21(10), 1321-1328.
- Panizza, M. y Cerisola, G. (2005). Application of diamond electrodes to electrochemical processes. *Electrochimica Acta*, 51(2), 191-199.
- Raffellini, S., Schenk, M., Guerrero, S. y Alzamora, S. A. (2011). Kinetics of Escherichia coli inactivation employing hydrogen peroxide at varying temperatures, pH and concentrations. *Food Control*, 22(6), 920-932.
- Saha, S. M., Tsuneto, F. y Yoshinori, N. (2004). Conversion of carbon dioxide to peroxycarbonate at boron-doped diamond electrode. *Electrochemistry Communications*, 6(2), 201-204.
- Schmalz, V., Dittmar, T., Haaken, D. y Worch, E. (2009). Electrochemical disinfection of biologically treated wastewater from small treatment systems by using boron-doped diamond (BDD) electrodes-Contribution for direct reuse of domestic wastewater. *Water Research*, 43(20), 5260-5266.
- Suffredini, H. B., Pedrosa, V. A., Codognoto, L., Machado, S. A. S., Rocha-Filho, R. C. y Avaca, L. A. (2004). Enhanced electrochemical response of boron-doped diamond electrodes brought on by a cathodic surface pretreatment. *Electrochimica Acta*, 49(22-23), 4021-4026.
- Velazquez-Peña, S., Sáez, C., Cañizares, P., Linares-Hernández, I., Martínez-Miranda, V., Barrera-Díaz, C. y Rodrigo M. A. (2013). Production of oxidants via electrolysis of carbonate solutions with conductive-diamond anodes. *Chemical Engineering Journal*, 230, 272-278.