

# Aplicaciones electroquímicas para el saneamiento ambiental

Jorge G. Ibáñez Cornejo\*

## Abstract

The inclusion of a discussion of the transformation and/or removal of pollutants by electron exchange on an electrode is proposed for electrochemistry or environmental science or engineering courses. The proposed themes include the advantages and challenges inherent to the electrochemical techniques as well as the use of direct and indirect techniques for the treatment of pollutants in gaseous, aqueous or solid media.

## Resumen

Se presenta una propuesta para incluir en un curso de electroquímica o de medio ambiente, un tópico sobre la transformación y/o remoción de contaminantes por medio del intercambio de electrones sobre un electrodo. Los temas propuestos incluyen las ventajas y los retos que ofrecen los métodos electroquímicos, así como el uso de las técnicas directas e indirectas para el tratamiento de contaminantes en medios gaseosos, acuosos o sólidos.

## Introducción

En el presente trabajo se propone la inclusión, en un curso de licenciatura o de posgrado sobre electroquímica o sobre medio ambiente, de un tópico que se enfoque en las posibilidades que los procesos y las técnicas electroquímicas ofrecen en el área de saneamiento ambiental y reciclado. Este tópico ha sido incluido exitosamente en un curso de electroquímica de la licenciatura en ingeniería química en nuestra institución. Al final del artículo se presenta una lista de referencias generales sobre el tema, que a su vez contienen referencias específicas a los temas discutidos a continuación.

Los procesos electroquímicos ofrecen varias opciones promisorias para la prevención y el sanea-

miento de problemas ambientales. Entre las principales características atractivas se cuentan:

- Versatilidad.* Estos procesos incluyen reducciones u oxidaciones directas o indirectas, separaciones de fases, concentraciones, diluciones y funciones biocidas que pueden tratar a muchos contaminantes gaseosos, líquidos y sólidos, además de que se pueden tratar desde microlitros hasta millones de litros.
- Eficiencia energética.* Los procesos electroquímicos normalmente requieren de condiciones más suaves que sus contrapartes convencionales (e.g. incineración). Asimismo, los potenciales pueden controlarse y los electrodos y celdas pueden diseñarse para minimizar las pérdidas de corriente debidas a una mala distribución de corriente, caídas de potencial y reacciones secundarias.
- Factibilidad de automatización.* Las variables eléctricas que se usan en los procesos electroquímicos ( $I$ ,  $E$ ) son especialmente adecuadas para facilitar la adquisición de datos, así como la automatización y control de procesos.
- Compatibilidad con el ambiente.* El principal reactivo, el electrón, es un reactivo "limpio" y con frecuencia no se requiere la adición de otros reactivos. Además, se puede aprovechar la alta selectividad de muchos de estos procesos para evitar la generación de productos secundarios no deseados.
- Eficiencia de costos.* Los equipos y operaciones electroquímicos son generalmente simples, y si están bien diseñados, también pueden ser económicos. Además, suelen requerir de poco mantenimiento y reemplazos debido parcialmente al hecho de tener pocas partes móviles.

Por supuesto que también hay muchos retos por enfrentar. Por ejemplo, a fin de alcanzar eficiencias de conversión altas a pesar de las concentraciones bajas de contaminantes que se tienen generalmente, es necesario analizar varias estrategias posibles para las aplicaciones particulares. Entre ellas se encuentran: el uso de electrodos tridimensionales, la promoción de regímenes turbulentos, operaciones de

\*Departamento de Ingeniería y Ciencias Químicas, Universidad Iberoamericana, Prol. Reforma 880, 01210 México, D.F. México.

jibanez@uibero.uia.mx

Recibido: 25 de marzo de 1996;

Aceptado: 7 de agosto de 1996.

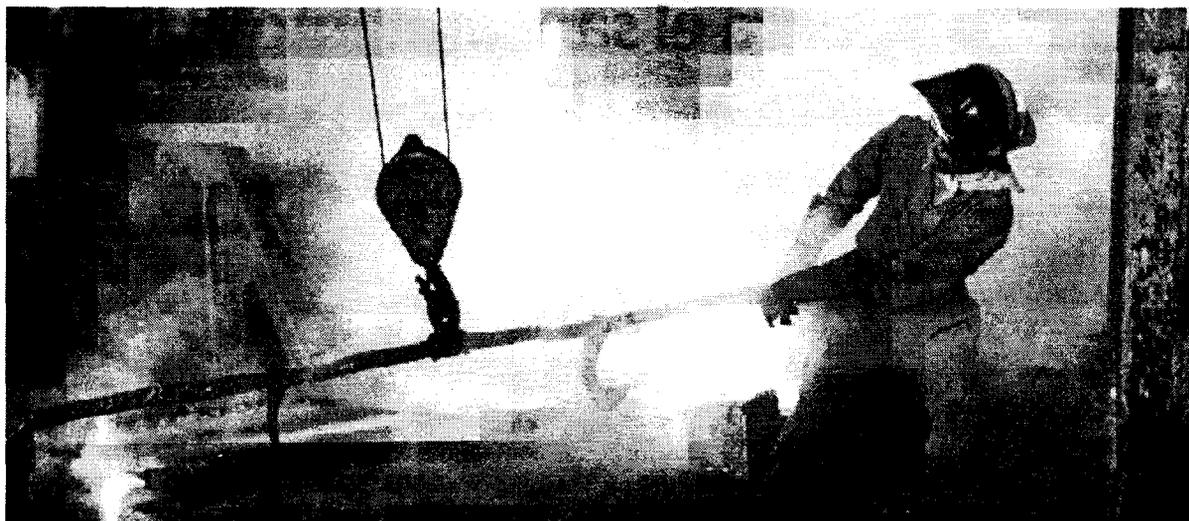


Foto: Francisco Cienfuegos

preconcentración, uso de sistemas multipasos, diseño de electrodos móviles, etcétera.

Las principales opciones electroquímicas para el saneamiento ambiental incluyen a las siguientes:

#### *Electrólisis directa*

Los contaminantes que son capaces de ser oxidados o reducidos en la superficie de un electrodo pueden, en principio, ser transformados o removidos de sistemas acuosos mediante la aplicación de potenciales adecuados en reactores electroquímicos. Desafortunadamente es frecuente tener reacciones secundarias o parásitas tales como la oxidación o reducción del disolvente—lo que representa un reto en el diseño de celda— y la selección de materiales. Estos procesos se pueden dividir en:

1. *Procesos anódicos.* La oxidación directa tiene la capacidad de degradar o transformar a muchos contaminantes orgánicos e inorgánicos. Ejemplos típicos son: la oxidación de iones cianuro, la decoloración de efluentes conteniendo tintes y colorantes mediante la destrucción de los grupos cromóforos, la oxidación de especies de Cr(III) a Cr(VI) para ser recicladas, etcétera.
2. *Procesos catódicos.* Los ejemplos de este tipo incluyen la reducción de compuestos aromáticos clorados a sus correspondientes (y menos tóxicos) aromáticos no clorados, la remoción de iones metálicos, etcétera.

#### *Electrólisis indirecta*

La idea aquí consiste en utilizar reactivos redox generados electroquímicamente a fin de convertir

especies contaminantes en productos menos dañinos. La especie redox actúa como un intermediario para transportar electrones entre el contaminante y el electrodo. Éstos se pueden dividir en:

1. *Procesos reversibles.* Aquí, el reactivo redox puede ser regenerado electroquímicamente y reciclado en el proceso. Por ejemplo, la especie Ag(II) es un agente oxidante que ha sido utilizado para la mineralización de compuestos orgánicos a nivel industrial. Las especies de Ag(I) que se producen se reciclan en un reactor electroquímico para regenerar Ag(II).
2. *Procesos irreversibles.* Éstos suponen la generación electroquímica de especies activas que dan lugar a procesos tales como la producción de intermediarios de vida corta (e.g. radicales OH<sup>·</sup>), incineración electroquímica de desechos fecales, manipulación del pH, electrocoagulación-electroflotación, etcétera.

#### *Procesos basados en membranas y/o en intercambio iónico*

Muchos de estos procesos han alcanzado ya un grado importante de madurez tecnológica para la separación de mezclas líquidas y gaseosas. Los principales ejemplos en el campo del saneamiento electroquímico y reciclado son probablemente los métodos de electromigración, de los cuales, la electrodialisis ha ganado el mercado más importante.

#### *Procesamiento electrocinético de suelos*

Se han utilizado campos eléctricos para la descontaminación de suelos mediante la colocación estraté-

gica de ánodos y cátodos enterrados. Los contaminantes en fase líquida se mueven mediante un efecto electroosmótico a través de los poros o túneles cargados eléctricamente, hasta ser descargados en pozos en donde son concentrados y removidos. Ejemplos típicos incluyen: fenoles, hidrocarburos, iones de metales pesados, etcétera.

#### Electrorremediación de gases

A fin de tratar electroquímicamente los gases contaminantes, éstos deben de ser primero disueltos en un disolvente ya sea por disolución o bien por reacción química. La conversión electroquímica puede entonces realizarse en dos modos: *a)* el gas se absorbe directamente en la celda y allí mismo es tratado (procesos internos de celda), o bien *b)* el gas se absorbe en un recipiente por separado y es posteriormente transferido a la celda electroquímica (procesos externos de celda). Los gases que han sido más estudiados son: CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O y Cl<sub>2</sub>.

#### Desinfección electroquímica de agua

La desinfección y la remoción de olores son problemas muy importantes que impactan a nuestra calidad de vida. La aplicación de un potencial en soluciones con contaminación biológica puede llevar a cabo su desinfección mediante la producción de sustancias altamente oxidantes (*e.g.* radicales OH·, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, Cl<sub>2</sub>, etcétera) o bien de sustancias que alteran el pH en los alrededores de los microorganismos (H<sup>+</sup>, OH<sup>-</sup>), así como mediante procesos directos que los electrocutan debido a la inducción de procesos rédox internos que promueven su desactivación.

#### Conclusiones

Muchos alumnos requieren de una discusión de las aplicaciones de la teoría que están estudiando en un curso determinado para aumentar su aprovechamiento y motivación. Aquí se ha presentado una propuesta para incluir un tópico que puede ser de mucho interés precisamente por la gama tan amplia de sus aplicaciones: la electroquímica ambiental.

#### Referencias

Bersier, P.M., Carlsson, L. y Bersier, J., Electrochemistry for a Better Environment, en: *Topics in Current Chemistry*, v. 170. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1994, p. 113-229.

- Bockris, J.O'M. y Nagy, Z., *Electrochemistry for Ecologists*, Plenum Press, Nueva York, 1974.
- Bockris, J.O'M., Ed., *Electrochemistry of Cleaner Environments*, Plenum Press, Nueva York, 1972.
- Fenton, J.M., Electrochemistry: energy, environment, efficiency, and economics, *Interface* (The Electrochem. Soc.) **3** [1] 38-44, 1994.
- Genders, J.D. y Weinberg, N., eds., *Electrochemistry for a Cleaner Environment*, The Electroynthesis Co., E. Amherst, Nueva York, 1992.
- Kalvoda, R. y Parsons, R., eds., *Electrochemistry in Research and Development*, Plenum Press, Nueva York, 1985.
- Kuhn, A.T., The Role of Electrochemistry in Environmental Control, cap. 5 en: *Modern Aspects of Electrochemistry*, v. 8, Plenum Press, Nueva York, 1972.
- Pletcher, D. y Weinberg, N.L., The green potential of electrochemistry. Part 1: The fundamentals, *Chem. Eng.* 98-103, Aug. 1992.
- Pletcher, D. y Weinberg, N.L., The green potential of electrochemistry. Part 2: The applications, *Chem. Eng.*, 132-141, Nov. 1992.
- Rajeshwar, K. e Ibanez, J.G., *Electrochemistry and the Environment*, Academic Press, San Diego, 1996 (en prensa).
- Rajeshwar, K., Ibanez, J.G. y Swain, G.M. Electrochemistry and the environment, *J. Appl. Electrochem.*, **24** [11] 1077-1091, 1994.
- Rose, T.L., Murphy, O., Rudd, E. y Conway, B.E., eds., *Proc. Symp. Water Purif. Photocat. Photoelectrochem. Electrochem. Proc.*, The Electrochemical Society, Inc., Pennington, Nueva Jersey, Proc. v. 94-19, 1994.
- Sequeira, C.A.C., ed. Environmentally Oriented Electrochemistry, *Studies in Environmental Science* #59. Elsevier, Amsterdam, 1994.
- Siegerman, H., Applications of electrochemistry to environmental problems, *Chem. Tech.*, 672-679, Nov. 1971.
- Tomkiewicz, M., Yoneyama, H., Haynes, R. y Hori, Y., eds., *Proc. Symp. Environ. Aspects of Electrochem. and Photoelectrochem.*, The Electrochemical Society, Inc., Pennington, Nueva Jersey, Proc. v. 93-18, 1993.
- Walsh, F. y Mills, G., Electrochemical techniques for a cleaner environment, *Chem. and Ind.*, **15**, 576-580, 1993.
- Walsh, F. y Mills, G., Electrochemical methods for pollution control, *Chem. Technol. Europe*, 13-18, April-May 1994.