

Es realmente difusa la barrera entre la revisión de la investigación de un tema especializado y una contribución para la actualización docente. Esta sección recoge artículos de revisión adecuados para la enseñanza.

De la ingeniería química a la ingeniería electroquímica

F. Coeuret*

Abstract

The framework and origin of Chemical Engineering is analyzed and within it the basis and recent advances of Electrochemical Engineering.

La ingeniería química, ciencia de los procesos de la industria química

Se sabe cuán esencial es la ciencia de los procesos cuando se trata de aplicar a escala comercial una transformación química, electroquímica o bioquímica, generalmente combinada con operaciones físicas o mecánicas (molienda, filtración, destilación, etcétera), dominada a nivel de laboratorio, es decir, al tamaño de la microescala. Estos procesos de transformación de la materia en productos funcionales para el hombre se clasifican en el sector económico llamado "secundario", que reúne todas las actividades industriales que tratan o transforman los productos naturales del sector primario (agricultura, pesca, minerales, etcétera) o ya parcialmente elaborados,

en productos útiles al hombre. Como se sabe, la importancia de ese sector secundario es sinónimo de adelanto económico.

El proceso de transformación (figura 1) es el sistema-herramienta industrial en el cual entran materia, energía, información, medios tecnológicos y humanos, con el fin de satisfacer nuestras necesidades y nuestros deseos, y esto de una manera técnica, económica y ecológicamente óptima. Este aspecto de la protección del medio ambiente ha tomado cada vez más importancia en el transcurso de los últimos treinta años.

La locución anglo-americana *chemical engineering* fue propuesta para representar el conjunto de conocimientos y de competencias del profesional *chemical engineer* especializado en los procesos de la industria química. Germinada en Inglaterra, la idea de este tipo de profesional pasó a los Estados Unidos de América donde fue aceptada y aplicada, a fines del siglo XIX, antes de difundirse primeramente al continente americano, y después hacia otros países. En los países hispano-americanos, la disciplina se introdujo alrededor de 1920 bajo el nombre de *ingeniería química*, siendo el *ingeniero químico* el profesional correspondiente (Kamenetzky, 1971; Valiente y Stivalet, 1988).

En sus inicios, la ingeniería química era casi únicamente arte, es decir maestría; pero, progresivamente, a medida que aparecieron en ella consideraciones científicas, llegó a ser una ciencia. Sin embargo, aun hoy bajo sus aspectos modernos, la ingeniería química queda siempre arte y ciencia a la vez, particularmente cuando se trata de la práctica.

La palabra "química" de "ingeniería química" puede originar confusión por parte de algunos que son externos a la disciplina, y que pueden considerar erróneamente que la esencia de ésta se identifica con los aspectos puramente químicos de las transformaciones. Al contrario, conviene considerar esta disciplina como una ciencia física cuyo objeto es concebir, diseñar, hacer construir y funcionar las mejores instalaciones, las cuales, aun si son de la industria química, involucran principalmente operaciones de tipo físico o mecánico. En efecto, en un proceso de la industria química, la etapa química que

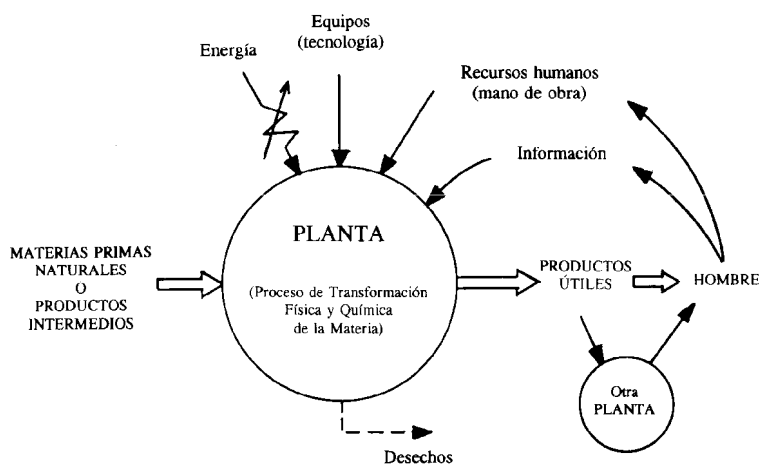


Figura 1. Representación general de un sistema de producción.

*Director de Investigación en el C.N.R.S. [Centre National de la Recherche Scientifique], Francia, y miembro de la U.R.A. C.N.R.S. n° 869. Es autor del libro *Introducción a la Ingeniería Electroquímica*, [Dirección: ENSCR, Av. Gal Leclerc, 35700 RENNES BEAULIEU, Francia]

Recibido: 10 de agosto de 1995;

Aceptado: 25 de octubre de 1995.

se lleva a cabo dentro de lo que se llama “reactor químico”, corazón y centro vital que justifica este proceso, a menudo es sólo una etapa entre muchas otras que son de naturaleza física o mecánica y cuyo peso financiero a nivel de las inversiones puede ser considerable, sobre todo cuando se trata de las operaciones de separación.

Por etapas sucesivas que marcaron su organización y su desarrollo, la ingeniería química llegó a su madurez como ciencia de los procesos de transformación física y química de la materia. Se suele reconocer que estas etapas fueron las siguientes:

- surgimiento, gracias a Arthur D. Little, del concepto de “operación unitaria” (1915/1920) y primera organización de la disciplina (Walker, Lewis y McAdams, 1923);
- nacimiento y desarrollo del concepto de “fenómenos de transporte” de la materia, de la energía y de la cantidad de movimiento (década 1950/1960), a través de un famoso libro (Bird, Stewart y Lightfoot, 1960), para servir de base científica común a las operaciones unitarias, como está mostrado en la figura 2;
- organización, a partir de 1957, de la rama denominada “ingeniería de las reacciones químicas” (Levenspiel, 1972) dedicada al estudio y al diseño de los equipos donde tienen lugar las reacciones químicas, es decir de los reactores químicos. Se considera que esta organización estaba hecha en 1978;
- finalmente, el tratamiento global o macroscópico, mejor dicho la “ingeniería de los sistemas” (*systems engineering*), y la modelación sistémica que le fue asociada (década 1960/1970).

La ingeniería electroquímica, rama de la ingeniería de procesos

Una vez sólidamente organizada sobre bases científicas, a partir de 1970 aproximadamente, la metodología de la ingeniería química se reveló útil y eficiente en otros campos de aplicación además del químico —y sobre todo del petroquímico— que casi esencialmente había servido de soporte y de objetivo principal a esta metodología. Así, a medida que aparecieron nuevas necesidades para el hombre (aumento de las productividades, nuevos productos, etcétera), esta metodología, además de seguir aplicándose al sector de la química, se aplicó progresivamente a la agro-alimentaria, al medio ambiente, a la metalurgia, a la bioquímica, ..., y al uso electroquímico de la

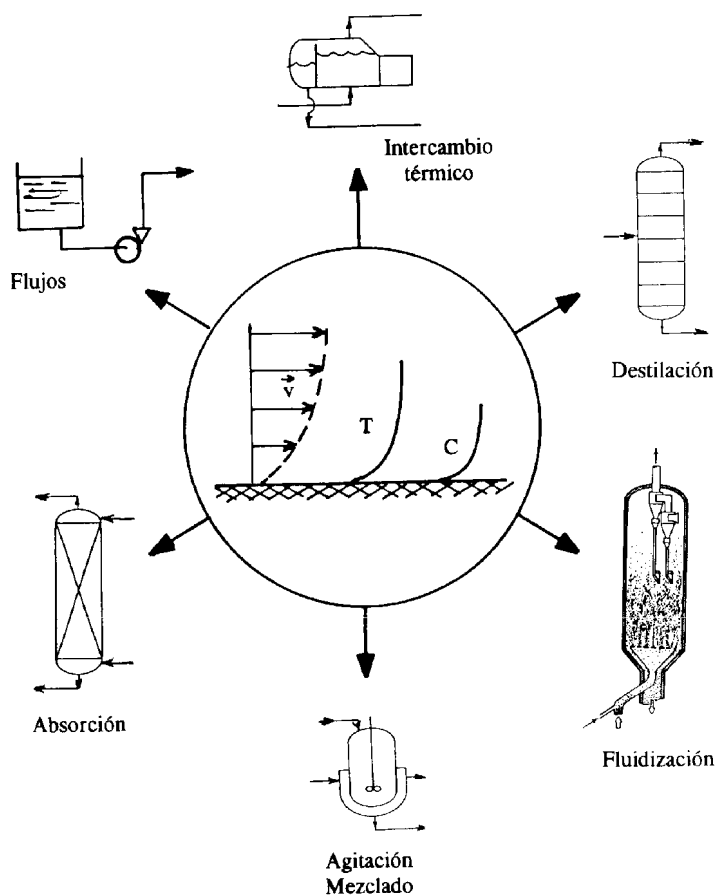


Figura 2. El concepto de “fenómenos de transporte”, base científica para las operaciones unitarias de la ingeniería química.

electricidad en la industria. Hacia 1980, la situación era tal que la metodología común era vista como contenida en un reservorio o “depósito de metodología” —llamado “ingeniería de procesos” (*process engineering*)— conectado a una red de sectores de aplicación que son las diferentes ingenierías (figura 3).

La ingeniería electroquímica surgió entonces, alrededor de 1970, como el sector de aplicación de los métodos de la ingeniería química, específicamente dedicado a las aplicaciones electroquímicas de la electricidad. Es cierto que los procesos electroquímicos ya existían desde hacía mucho tiempo, combinando operaciones unitarias (de tipo físico o mecánico) y procesos unitarios, poniendo en obra reacciones electroquímicas (celdas de electrólisis), pero la concepción y el diseño de estos últimos procesos unitarios procedían principalmente de la maestría y/o de consideraciones tecnológicas.

Un siglo antes que apareciera la ingeniería elec-

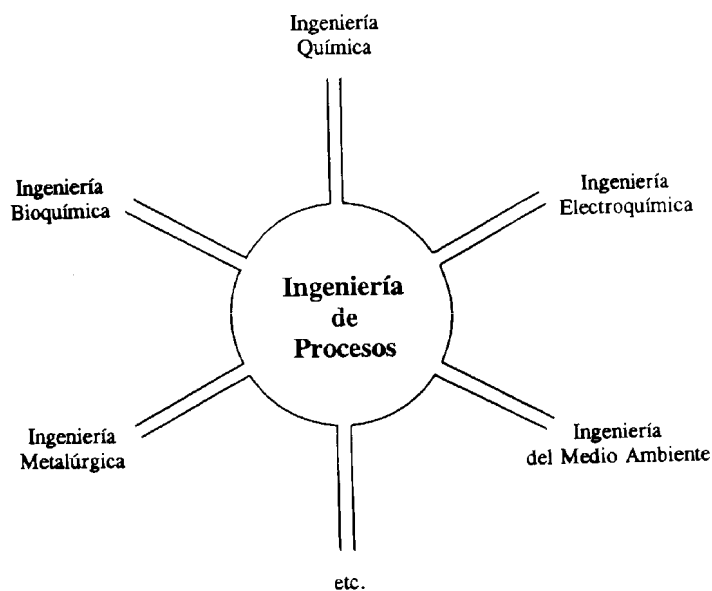


Figura 3. La ingeniería de procesos, metodología común a las ingenierías de transformación físico-química de la materia.

troquímica, es decir hacia el año 1870, la electroquímica tenía todavía poca aplicación —y casi esencialmente en las pilas primarias y en la galvanoplastia— por ser difícil y costoso de producir grandes cantidades de electricidad. La industria electroquímica sólo se afirmó a fines de la década 1870/1880 como consecuencia de la aparición sucesiva de la dinamo (1870), de la producción de energía mecánica de origen hidráulico en las zonas montañosas y del desarrollo de la electrotecnia, es decir de la disponibilidad de potentes máquinas eléctricas. Los primeros esfuerzos estuvieron dedicados a la producción de cloratos y de cloro-sosa por electrólisis de disoluciones acuosas de cloruro de sodio. Sin embargo, cabe destacar que antes de la aceptación de la teoría de Arrhenius —difundida en 1887, pero muy controvertida— las celdas electrolíticas entonces imaginadas sufrían el defecto de basarse en conceptos erróneos de la teoría electrolítica, como se nota al examinar patentes de aquella época (Coeuret, 1993). Un concepto erróneo aceptado durante mucho tiempo fue el de la existencia de los iones sólo al nivel de los electrodos, y únicamente cuando pasaba la corriente eléctrica, concepto que fue derrotado por la teoría de Arrhenius de la disociación iónica.

La historia de las ciencias nos enseña cómo, hace un siglo, los inventores manifestaban ingenio y maestría para proponer celdas originales que permitieran

aplicar la electrólisis, cuyo concepto teórico correcto no era todavía aceptado por muchos. La figura 4 muestra esquemas de dos tipos de celdas electrolíticas que fueron patentadas en Francia durante la última década del siglo XIX.

Evidentemente, en aquella época, los materiales que podían usarse como ánodos eran muy pocos; casi sólo existía el grafito.

Con los años, y después de ser aceptada la teoría de Arrhenius, la electroquímica industrial tomó importancia hasta ocupar una posición determinante en algunos campos (electrólisis del agua, de las disoluciones salinas de metales alcalinos, alcalinotérreos o de metales pesados). Sin embargo, en cuanto a celdas, las realizaciones industriales siguieron basándose más bien sobre conceptos tecnológicos que eran suficientes para resolver los problemas planteados en cada caso. En otras palabras, si las etapas físicas o mecánicas de los procesos electroquímicos pudieron, y podían, ser dimensionadas gracias a los progresivos conocimientos de las operaciones unitarias, las etapas electroquímicas quedaban en manos de los electroquímicos industriales.

La aplicación de los fenómenos de transporte en electroquímica contribuyó de forma determinante, a partir del año 1970 aproximadamente, al surgimiento de la ingeniería electroquímica, el cual se dio dentro de un contexto internacional de inquietud en cuanto a la economía de energía de origen petrolero (y por eso la búsqueda de un uso más intensivo de la electricidad de origen nuclear), a la economía de materias primas metálicas y a la protección del medio ambiente. Estos dos últimos puntos se confundían cuando se trataba de extraer metales pesados contaminantes y/o raros contenidos a baja concentración en disoluciones acuosas; en el caso de la protección del medio ambiente, tal extracción había de hacerse hasta llegar a concentraciones muy bajas. Para efectuar electrolíticamente esta operación, se necesitaba concebir, estudiar y diseñar celdas de otro tipo de las que ya existían y que estaban adaptadas al tratamiento de disoluciones mucho más concentradas. Este problema de la electrólisis de disoluciones de baja concentración se planteaba también para el caso de los electrólitos considerados en los procesos electroorgánicos. Poco a poco, la celda electrolítica llegó a llamarse “reactor electroquímico” y se empezó a describir su comportamiento por métodos similares a los que se desarrollaron para los reactores químicos, constituyendo así la rama de la ingeniería de las reacciones químicas (Levenspiel, 1972).

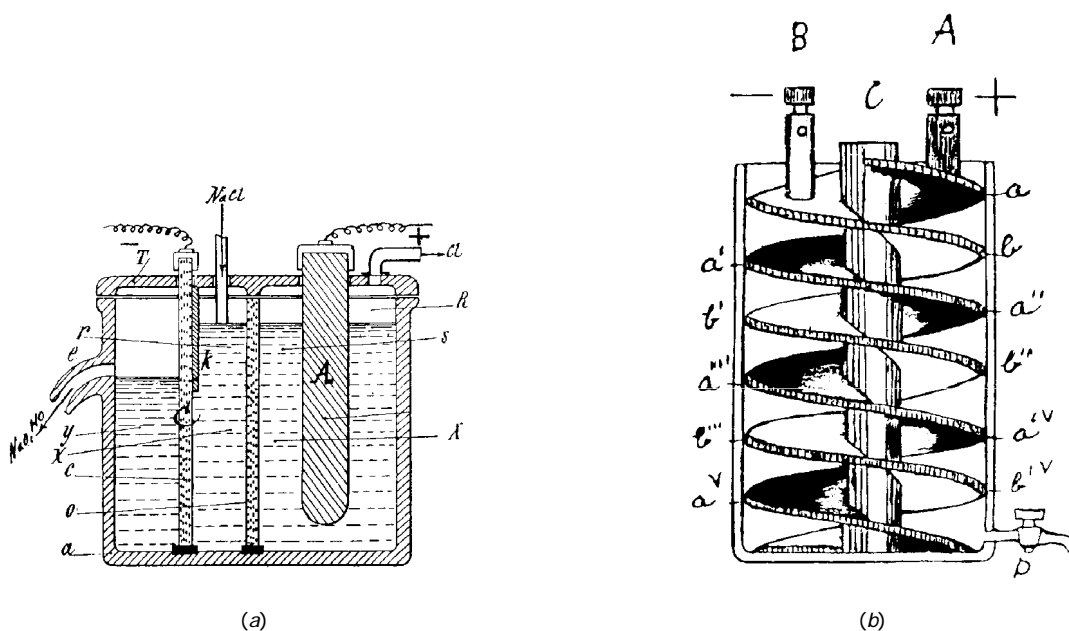


Figura 4. Esquemas de celdas propuestas en patentes francesas: (a) de Hulin, 1893; corresponde a una celda para producción de cloro y de sosa por electrólisis de disoluciones acuosas de NaCl (Hulin, 1893 y 1894). Esta celda fue probablemente una de las primeras –si no la primera– en utilizar un electrodo (aquí un cátodo) poroso percolado por el electrolito, con el fin de evitar que el hidróxido de sodio producido por la reacción catódica estuviera mezclado con el electrolito no tratado. Si el inventor proponía varios materiales conductores para constituir el electrodo poroso, razonaba de acuerdo con el concepto iónico según el cual los iones se formaban exclusivamente en los electrodos, es decir que desconocía la conducción iónica del electrolito de los poros y entonces sólo consideraba que el cátodo era activo en su límite frente al ánodo, el resto del volumen actuando como

filtro. A su dispositivo, el inventor lo llamaba *electrodo-filtro*. Cabe notar que ese inventor usaba NaO,HO como fórmula química para el hidróxido de sodio, razonando entonces de acuerdo con el sistema de los equivalentes químicos, con $\text{O} = 8$ en vez de $\text{O} = 16$ como corresponde según la teoría atómica. Este tipo de celda no tuvo éxito por tener poco rendimiento y también por haber olvidado la producción de hidrógeno dentro de los poros del cátodo.

(b) de Peyrusson, 1896. Muestra una celda de canal helicoidal propuesta en 1896 en un complemento de patente francesa (Peyrusson, 1896); su inventor la destinaba al tratamiento electrolítico de los vinos y de los jugos azucarados.

La densidad de corriente (ddc) máxima admisible a un determinado electrodo es una magnitud proporcional a la concentración de los iones reaccionantes, y varía como el inverso de la resistencia difusional a nivel de ese electrodo. Para lograr una intensidad de corriente (y entonces una producción por unidad de tiempo) que fuera suficientemente grande sin aumentar demasiado el tamaño del reactor, convenía buscar la reducción de la resistencia difusional disipando energía mecánica cerca del electrodo (promoción de turbulencia, hidrodinámica particular, etcétera) o empleando electrodos de gran área específica.

Estas ideas originaron nuevos reactores electroquímicos; la tabla 1 presenta, en tres categorías, ejemplos de esos reactores de nueva generación. De ellos muchos no tuvieron éxito comercial, pero sus estudios contribuyeron indudablemente a forjar

poco a poco la disciplina de la ingeniería electroquímica. Un tema como el de la síntesis electro-orgánica contribuyó también mucho a los avances en ingeniería electroquímica, aun si la complejidad de los procesos involucrados –muy a menudo hay acoplamiento de reacción electroquímica heterogénea con reacción química en fase homogénea– sumada a otras dificultades, hicieron que muchas esperanzas puestas en ese campo fueron más bien desilusiones, por lo menos hasta ahora. Como otros temas que contribuyeron, a través de trabajos de investigación, al desarrollo de la ingeniería electroquímica, hay que mencionar los siguientes: electrólisis del agua, pilas de combustible, electrodiálisis, tratamientos de superficies, etcétera.

Como fue dicho anteriormente, la ingeniería electroquímica no originó los procesos electroquímicos industriales, que ya existían desde hace mucho,

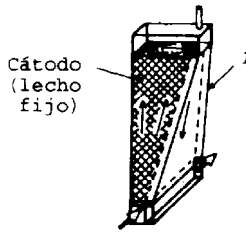
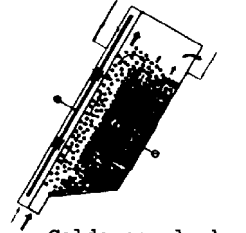
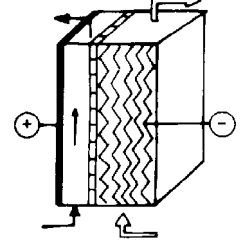
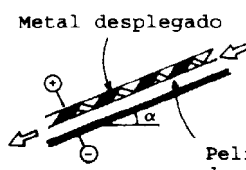
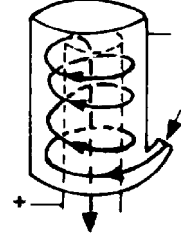
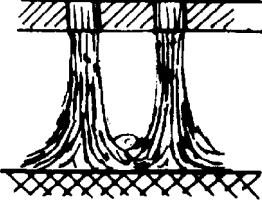
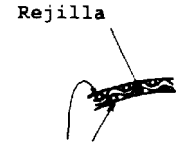
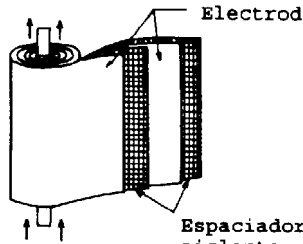
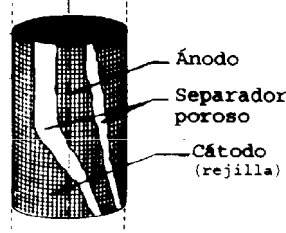
<p>REACTORES DE E. P. P.</p>	 <p>Cátodo (lecho fijo) Ánodo</p> <p><u>Celda ENVIRO</u></p>	 <p><u>Celda con lecho en circulación</u></p>	 <p><u>Celda con metal desplegado</u></p>
<p>REACTORES CON UNA HIDRODINÁMICA PARTICULAR</p>	 <p>Metal desplegado</p> <p>Película descendente</p> <p><u>Celda de PELÍCULA DESCENDENTE</u></p>	 <p><u>Celda con hidrodinámica en espiral</u></p>	 <p><u>Impacto de chorros</u></p>
<p>REACTORES CON GRAN SUPERFICIE DESARROLLADA</p>	 <p>Rejilla</p> <p>Electrodos</p> <p><u>Celda SWISS-ROLL</u></p>	 <p>Electrodos</p> <p>Espaciador aislante en forma de rejilla</p>	 <p>Ánodo</p> <p>Separador poroso</p> <p>Cátodo (rejilla)</p> <p><u>Celda E.S.E.</u></p>

Tabla 1. Familias de reactores electroquímicos de nueva generación.

sino que permitió mejorar procesos existentes y dar luz a otros tipos de aplicaciones electroquímicas, gracias a los conocimientos científicos adquiridos, a un mejor diseño y/o a una innovación en cuanto al reactor electroquímico. Se sabe que, al tener lugar las reacciones electroquímicas sobre superficies sólidas (reacciones heterogéneas), los reactores electroquímicos suelen tener un alto costo —se necesita construir un volumen (la celda) para llevar a cabo una reacción sobre una superficie sólida de este volumen, y generalmente una superficie límite—comparándolos con procesos químicos en fase homogénea—todo el volumen construido puede servir para la reacción. También, durante mucho tiempo, la escasez de materiales capaces de soportar potenciales anódicos frenó el desarrollo de la electroquí-

mica industrial. Durante mucho tiempo, sólo hubo, principalmente, el grafito como material anódico aceptable, con los inconvenientes ligados a su consumo progresivo en el tiempo. La aparición, a mediados de los años sesenta, de los ánodos dimensionalmente estables (*Dimensional Stable Anodes* o DSA) que consisten en óxidos mixtos (por ejemplo $\text{TiO}_2/\text{RuO}_2$) depositados sobre un soporte de titanio, ayudó mucho a mejorar la concepción y a diseñar otros tipos de celdas. Puede decirse que el despliegue de la ingeniería electroquímica no es independiente de la disponibilidad de los DSA.

Ejemplos de aplicación reciente

Para ilustrar el campo de actuación de la ingeniería electroquímica en los últimos decenios, considere-

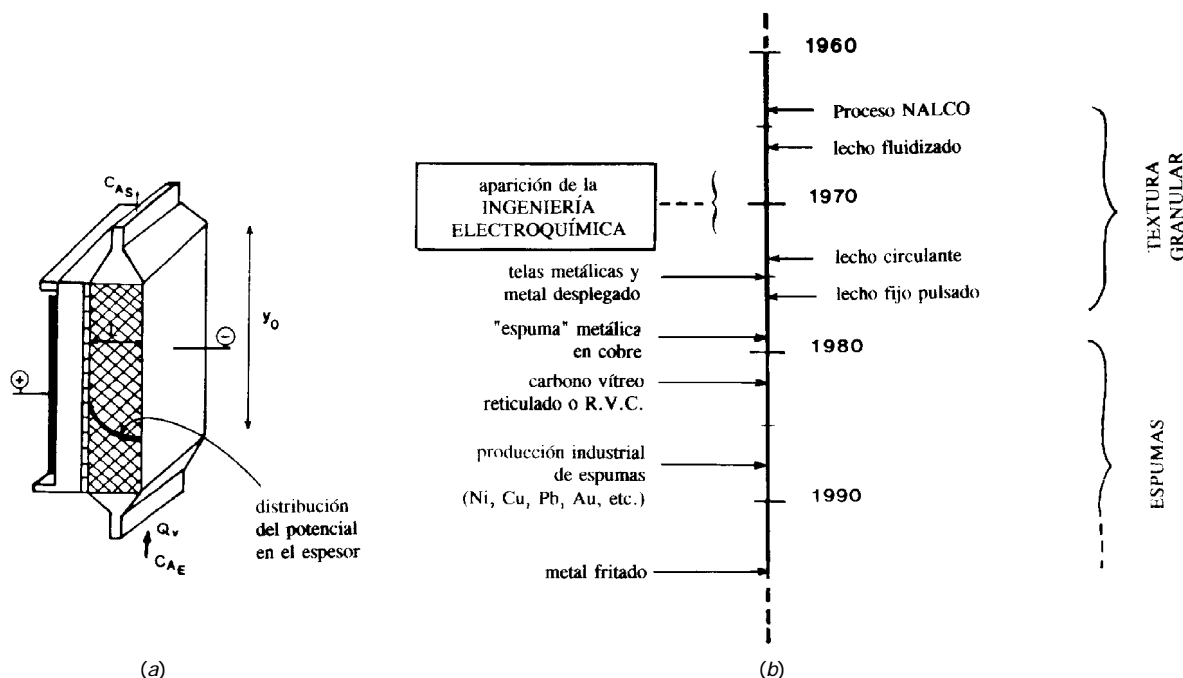


Figura 5. Electroodos porosos percolados: (a) esquema de una celda paralelepípedica; (b) ubicación en el tiempo de la aparición de los materiales utilizados.

mos algunos ejemplos tomados de un reciente libro en lengua española (Coeuret, 1992):

1. *Reactores con electrodos de gran área específica.* El concepto de electrodos de gran área específica se introdujo con el fin de poder tratar electroquímicamente disoluciones de baja concentración sin aumentar exageradamente los costos de inversión; un compartimiento de celda, antes lleno de electrolito, podía estar ocupado por un electrodo poroso. Sin embargo, apareció el problema de la distribución del potencial de electrodo dentro del volumen poroso. El esfuerzo científico llevado a cabo para resolver este problema constituyó una contribución importante de la ingeniería electroquímica, y todavía el tema sigue siendo estudiado. La figura 5(a) muestra un esquema de celda que contiene un cátodo poroso percolado, mientras que la figura 5(b) indica, en una escala de tiempo, cómo evolucionó el material de electrodo poroso a medida que aparecían productos nuevos en el mercado. Se distingue el periodo de los granos metálicos (utilizados en lechos granulares), el de los apilamientos de rejillas de metal desplegado, y el de los apilamientos de hojas de espuma metálica. Hoy día, la espuma metálica, comercialmente dispo-

nible con varios metales (Ni, Cu, Au, Ag, Pb), es probablemente el material más prometedor para pequeñas celdas, debido a su alta superficie específica (hasta $10,000\text{m}^2/\text{m}^3$) y su fácil empleo. Sin embargo, para celdas de mayor tamaño, el metal desplegado es más adecuado.

La aplicación principal de los electrodos porosos percolados ha sido, y sigue siendo, en el campo de la recuperación de metales (nobles o no) contenidos a baja concentración en disoluciones acuosas.

2. *Celda Swiss-Roll.* Esta celda, que aparece en la tabla 1, consiste en un enrollado de dos placas paralelas y de dos espaciadores aislantes en forma de rejilla, estos últimos actuando como promotores de turbulencia del electrolito. Ese reactor electroquímico se ha utilizado en la fabricación del ácido diacetona-gulónico (DAG), producto intermedio en la elaboración de la vitamina C a partir de la diacetona-L-sorbosa (DAS). Alrededor de 1980 se llegó a usar electrodos de varios centenares de metros cuadrados, con una intensidad de 20,000 Amperios y produciendo dos toneladas de DAG por día, sin que se tenga información sobre el uso actual de este tipo de celda.

3. *Reactor electroquímico de película descendente.* Este reactor, que se da también en la tabla 1, es un dispositivo a escala laboratorio y mini-piloto que dio lugar a una apertura hacia la aplicación industrial. Columnas asociadas en serie hidrodinámica con varios módulos idénticos, constituyeron dispositivos aplicados a la recuperación de cobre y, por otro lado, a la electroprecipitación de CaCO_3 a partir de aguas duras.

4. *Micro-reactores para simular dientes.* Se da aquí a continuación un ejemplo de aplicación de los métodos de la ingeniería electroquímica al campo de la ingeniería biomédica, de acuerdo con el concepto de interconexión entre las ingenierías, como se muestra en la figura 3. El dispositivo fue construido para responder a una pregunta que se hacía en odontología y que era: ¿cómo saber si los canales secundarios de un diente [figura 6(a)] son o no irrigados por los aparatos provistos de una lima en vibración, y alrededor de la cual se inyecta un líquido desinfectante? El estudio de micro-reactores [figura 6(b)] en material acrílico que simulaban dientes, con

un canal principal cilíndrico recto y canales laterales perpendiculares e inclinados, en cuyos fondos se fijaron electrodos, permitió dar respuesta a esta pregunta. La determinación de la corriente eléctrica límite a nivel de esos electrodos, bajo condiciones dadas de vibración de la lima (figura 6) dentro de un electrólito adecuado, condujo a datos semicuantitativos sobre la magnitud de la renovación de la superficie de un determinado electrodo por el electrólito.

Conocimientos actuales de la ingeniería electroquímica

La ingeniería electroquímica, rama relativamente joven de la ingeniería de procesos, está hoy bastante bien organizada. Sin dejar de lado los varios libros dedicados a la electroquímica industrial y/o a los fenómenos de transporte en electroquímica, se seleccionaron en la bibliografía nueve libros de ingeniería electroquímica; entre ellos uno (Coeuret, 1992), a la vez libro introductorio de texto y libro de referencia, está en español en su versión original y única. Estos libros no tratan de las operaciones unitarias, las

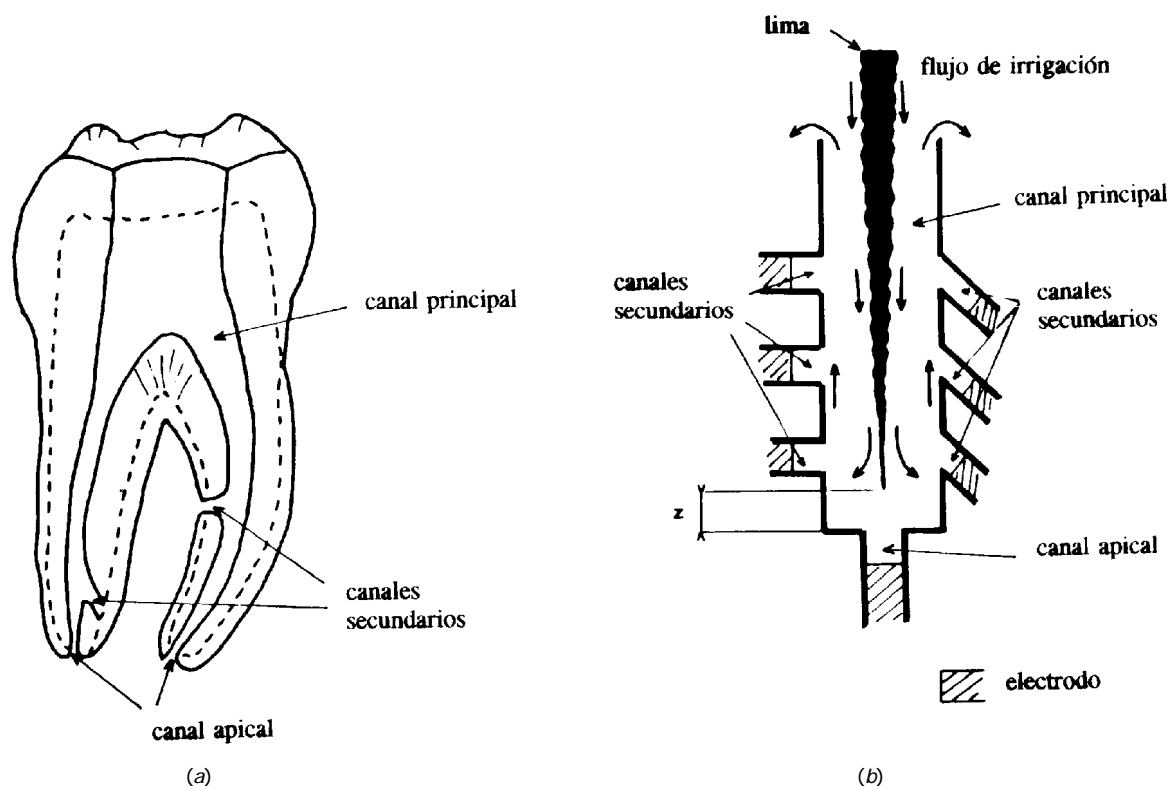


Figura 6. Esquema de (a) un diente y (b) de un microrreactor como modelo analógico.

cuales se encuentran descritas en otros libros —dado que son comunes a todos los procesos de transformación física de la materia—, sino que insisten sobre el “corazón” del proceso, es decir sobre el reactor electroquímico. Como se ha dicho previamente, este órgano vital debe funcionar lo mejor posible, no a causa de su costo, sino porque un mal funcionamiento de ese reactor puede influir sobre la magnitud del costo de operaciones situadas a otro nivel del proceso, como lo son las separaciones. Se sabe que, en los procesos químicos, si hay muchas reacciones secundarias al lado de la reacción principal, el peso de las separaciones puede ser determinante a nivel económico. Esto hizo que la evolución de la situación económica llegara, casi para todos los procesos donde ocurre una transformación química (o electroquímica, o bioquímica, etcétera), a dar gran importancia al buen diseño del reactor. Por supuesto, esto vale para los procesos industriales que involucran reacciones electroquímicas, dando entonces importancia básica a los conocimientos de la ingeniería electroquímica. En este campo, el camino entre la microescala y el reactor industrial, sufre también de los problemas generalmente observados en estudios de extrapolación, es decir que el funcionamiento puede depender fuertemente de las modificaciones hidrodinámicas que aparecen como consecuencia del cambio de escala.

Conclusiones

Hoy día, tal vez sea en el campo de la protección ambiental que la ingeniería electroquímica encuentra su principal terreno de aplicación. Tomemos como ejemplo el caso de los efluentes industriales que contienen iones de metales pesados. Además de la ventaja de usar la electricidad, forma no contaminante de la energía, ¡la recuperación electrolítica no puede ser culpada de generar una transferencia de contaminación!, como ocurre cuando se precipitan químicamente estos mismos metales bajo la forma de hidróxidos que hay que someter a un tratamiento ulterior. Los países industrializados han sido sensibilizados a estos problemas de protección ambiental y están sometidos a normas estrictas en lo relacionado a efluentes; los demás países tienden cada día más a tomar el mismo camino. Para todos, la ingeniería electroquímica ofrece posibilidades útiles en este campo, sin contar con los demás campos donde puede intervenir cada vez que la reacción electroquímica puede tomarse en cuenta. ▣

Bibliografía

- Bird, R.B., Stewart, W.E., y Lighfoot, E.N., *Transport Phenomena*, John Wiley and Sons, Nueva York, 1960. Edición en español: *Fenómenos de Transporte*, Reverté, Barcelona, 1964.
- Coeuret, F., “L'Électrolyse au XIX^e siècle. Regards sur la théorie et sur quelques brevets français de cellules électrolytiques déposés il y a cent ans”, en *L'Actualité Chimique* (París), julio-agosto-septiembre, p. 33-39, 1993.
- Hulin, P.L., *Procédé et appareil électrolytiques pour la séparation immédiate des produits d'électrolyse liquides ou dissous*, patente francesa n° 234.327 (25/11/ 1893 y 23/11/1894)
- Kamenetzky, M., *La ingeniería química*, Ed. Universitaria de Buenos Aires, Argentina, 1971.
- Levenspiel, O., *Chemical Reaction Engineering*, John Wiley and Sons, Nueva York, 1972. Edición en español: *Ingeniería de las reacciones químicas*, Reverté, Barcelona, 1978, 1990.
- Peyrusson, A.E., *Perfectionnements aux appareils et procédés d'électrolyse*, patente francesa n° 250.954 del 14/09/1895. Certificado de adición del 24/07/1896.
- Valiente, A., y Stivalet, R.P., *El ingeniero químico ¿qué hace?*, Alhambra Mexicana, México, 1988.
- Walker, W.H., Lewis, W.K., y McAdams, W.H., *Principles of Chemical Engineering*, McGraw-Hill Book Co., Inc., Nueva York, 1923.

Libros sobre ingeniería electroquímica

- Coeuret, F., *Introducción a la Ingeniería Electroquímica*, Reverté, Barcelona, 1992.
- Coeuret, F., y Storck, A., *Éléments de Génie Électrochimique*, Tec.-Doc. Lavoisier, París, 1984; 2^{da} impresión, 1993.
- Fahidy, T.Z., *Principles of Electrochemical Reactor Analysis*, Elsevier, 1985.
- Goodridge, F. y Scott, K., *Electrochemical Process Engineering*, Plenum Press, Nueva York, 1995.
- Ismail, M.I. (ed.), *Electrochemical Reactors-Their Science and Technology*, part A, Elsevier, 1989.
- Pickett, D.J., *Electrochemical Reactor Design*, Elsevier, 1^{ra} ed., 1977; 2^{da} ed., 1979.
- Rousar, I., Micka, K., y Kimla, A., *Electrochemical Engineering*, vols. I y II, Elsevier, 1985.
- Scott, K., *Electrochemical Reaction Engineering*, Academic Press, Londres, 1991.
- Walsh, F., *A First Course in Electrochemical Engineering*, The Electrochemical Consultancy, Romsey, Hants., G.B., 1993.