

Es realmente difusa la barrera entre la revisión de la investigación de un tema especializado y una contribución para la actualización docente.

Ingeniería de los procesos electroquímicos ¿De dónde viene y en qué consiste?

*François Cœuret**

Abstract [*Electrochemical Engineering: Origins and objectives*]

Issued 30 years ago from the organized chemical engineering, electrochemical process engineering, more frequently called electrochemical engineering, is today a specific branch of the process engineering. It applies in several industrial fields, as for example the cleaning of liquid effluents. The paper recalls the origins of the electrochemical engineering and presents a few orientations of this discipline regarding to electrochemical reactors.

La obra pionera de D.J. Pickett (1977) inició una serie de libros dedicados a la Ingeniería Electroquímica. Hoy día, entre la decena de versiones originales de esos libros aquí citados en la bibliografía, una sola está en español (Cœuret, 1992). Sin embargo, conviene notar que también existen libros de Electroquímica Industrial y otros dedicados específicamente a los fenómenos de transporte en electroquímica.

¿Qué le dio origen y cuál es el objeto de la Ingeniería Electroquímica, locución comúnmente utilizada para designar la Ingeniería de los Procesos Electroquímicos? Son preguntas a las cuales el presente texto pretende dar respuesta, complementando y actualizando así un artículo anterior (Cœuret, 1996).

Reseña histórica sobre la ingeniería química

La Ingeniería Electroquímica –o Ingeniería de los Procesos Electroquímicos– apareció al principio de los años setenta como resultado de la interacción de la Electroquímica y de sus aspectos industriales con la Ingeniería Química, cuyo desarrollo había sido tal, que sus conocimientos y sus métodos resul-

taban muy útiles en diferentes ramas industriales de transformación físico-química de la materia y de la energía.

Conviene presentar en algunas líneas cuáles fueron las principales etapas del desarrollo de la Ingeniería Química hasta los años 1970.

Surgido alrededor de 1890 en Norte América, el profesional *chemical engineer* (en los países de habla española fue, pero más tarde, el ingeniero químico) había sido imaginado para dedicarse a la realización y al funcionamiento de las plantas de la industria química. En aquella época, la economía exigía la concepción de unidades químicas que pudieran fabricar nuevos productos recientemente conocidos pero todavía no comercializados. Como lo muestra la figura 1, su competencia se veía entre la del químico industrial (buenos conocimientos de química, pero pocos de térmica y/o de mecánica) y la del ingeniero especializado en térmica o en mecánica (con pocos conocimientos de química). La razón fue que, al no comprenderse bien estos dos últimos, la innovación en cuestión de procesos era frenada. Al ingeniero químico se lo vio entonces como un profesional que se dedicaría específicamente a los procesos. Sin embargo, a principios del siglo XX, él practicaba más arte que ciencia.

Se puede considerar que a lo largo del tiempo y hasta la década de los años 1970, la evolución de la ingeniería química (o disciplina del ingeniero químico) se hizo en cuatro etapas sucesivas, cada una marcada por un nuevo concepto determinante:

- el concepto de “operación unitaria” (1915) permitió considerar cualquier proceso químico como una serie coordinada de operaciones unitarias en las cuales intervenía una transformación física o un tratamiento físico o mecánico; a estas operaciones se sumaban uno o varios procesos unitarios, sedes de transformaciones químicas. Fue durante la etapa correspondiente a la aparición y al comienzo del desarrollo de ese concepto que la transferencia tecnológica hizo que, bajo la denominación “ingeniería química”, el concepto angloamericano del *chemical engineering* pasó a los países hispano-americanos como fue recordado por Valiente y Stivalet (1988);

Educación Química agradece al Dr. Pedro Roquero las correcciones que introdujo al escrito original del Dr. Cœuret.

* Actualmente consultor en ingeniería química/electroquímica (rue de Rennes, 35235 Thorigné-Fouillard, France), el autor fue Director de Investigación en la U.M.R. C.N.R.S. n 6607, E.P.U.N., B.P. 50609 - 44306 Nantes Cedex 3 (France).

Correo electrónico: terueoc@wanadoo.fr

Recibido: 6 de junio de 2006; aceptado: 10 de febrero de 2007.

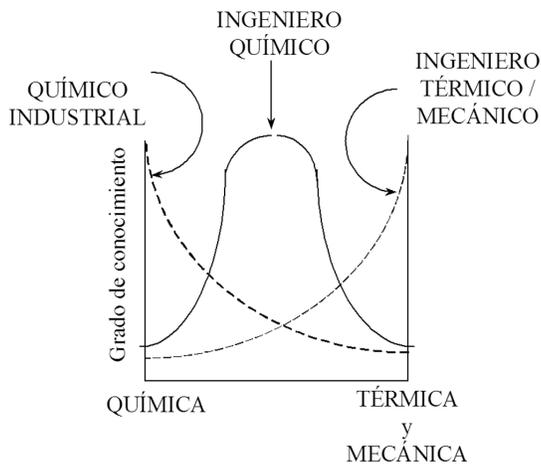


Figura 1. El ingeniero químico entre el químico industrial y el ingeniero especializado en térmica y/o en mecánica

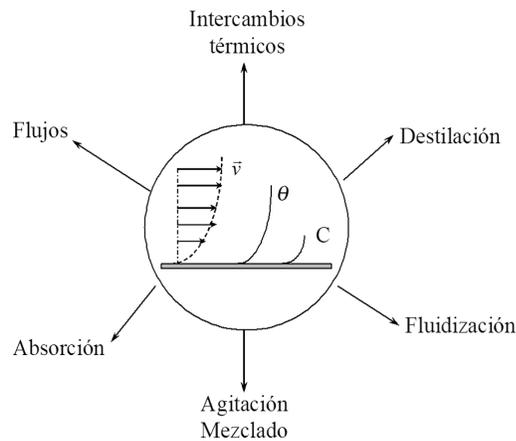


Figura 2. Los fenómenos de transporte como base científica de las operaciones unitarias

- el concepto de “fenómenos de transporte” (1950), cuya madurez se materializó en el famoso libro de Bird, Stewart y Lighfoot (1960/1964), permitió dar una base analítica común a las operaciones unitarias, como lo deja comprender la figura 2 cuyo centro metodológico muestra, a lo largo de una placa plana, tres perfiles que corresponden respectivamente a tres transportes (de materia, de calor, de cantidad de movimiento). Después, con el tiempo, ese concepto de fenómenos de transporte llegó a constituir una materia importante a nivel de la enseñanza de la ingeniería química y también a ser una potente herramienta entre las manos de los investigadores en el campo de la disciplina;
- el concepto de “ingeniería de las reacciones químicas” vino organizándose a partir de 1957 para conocer mejor el funcionamiento de los equipos donde ocurren reacciones químicas y para contribuir al diseño de esos equipos. Al dedicarse a las partes de los procesos que habían sido dejadas de lado por las operaciones unitarias, esa nueva rama, basándose sobre la noción de reactor químico, venía a completar las bases analíticas de los fenómenos de transporte. El reactor apareció como el corazón del proceso, es decir como un órgano vital que debe funcionar lo mejor posible, no tanto por su costo sino porque su buen diseño y su buen funcionamiento pueden influenciar la importancia de etapas de separación generalmente costosas;
- finalmente, el concepto de “sistema”, o de “sistémica”, es decir de descripción macroscópica

(por oposición al análisis sistemático, es decir detallado), se difundió durante los años sesenta y setenta desde los Estados Unidos de América donde había aparecido. Se trataba de un método global de descripción de los sistemas complejos como lo son los sistemas industriales, método que se concretizaba también en la modelización “sistémica” de procesos químicos, es decir en su descripción por modelos. El modelo no es una estricta representación de esa compleja realidad, sino un esquema simplificado que es comprensible y capaz de describir, en ciertas condiciones y con ecuaciones matemáticas simples, la apariencia de esa realidad.

Es así que, al principio de los años setenta, la Ingeniería Química estaba ya establecida como ciencia. Gracias a cierta cantidad de arte, siempre (y aún ahora) necesaria, esta ciencia permitió entonces al ingeniero químico diseñar y hacer funcionar las plantas químicas. Tal vez conviene subrayar que si la palabra “química” está presente en su denominación, en los hechos la ingeniería química se asemeja más a una ciencia física; en efecto, si está dedicada a la producción industrial de compuestos químicos, la mayoría de las operaciones que intervienen en éstas son de naturaleza física o mecánica, a pesar de la existencia de algunas operaciones químicas que ocurren generalmente en el reactor (o corazón del proceso) en el cual también los aspectos físicos (y sobre todo térmicos) y/o dinámicos son muy a menudo controlantes.

Se ha de reconocer que, en las últimas décadas,

el considerable desarrollo de las computadoras y su uso cada día más intensivo, vinieron a dar un aspecto más moderno a la ingeniería química, gracias a las soluciones rápidamente obtenidas de ciertos problemas, a la simulación asistida por computadora y al manejo informatizado de los procesos. Sin embargo, los conceptos de operación unitaria, de fenómenos de transporte y de reactor químico, quedan hoy día como conceptos básicos de la disciplina.

De la electroquímica industrial a la ingeniería electroquímica

Los procesos electroquímicos industriales surgieron en las últimas décadas del siglo XIX como consecuencia de la aparición, casi conjunta, de la producción intensiva de corriente continua con dinamos usando energía hidráulica, y de la adecuada teoría de la electrólisis o teoría de Arrhenius de la disociación electrolítica. Esta última teoría fue propuesta en 1887, justo el año en que el profesional *chemical engineer* fue imaginado en Inglaterra (Manchester) antes de que la idea pasara a Norteamérica, como se ha dicho anteriormente. Si se puede tomar el ejemplo de Francia, la industria electroquímica apareció y se desarrolló efectivamente en la zona montañosa de los Alpes donde había energía hidráulica; eso se hizo principalmente alrededor de los problemas planteados por las producciones de clorato, así como de cloro y de sosa o de sodio por electrólisis del cloruro de sodio, sea en medio acuoso, sea en medio fundido. Fue interesante observar (Cœuret, 1993), al leer patentes francesas de los años 1890 –patentes cuyos autores marcaron con sus nombres la historia de la electroquímica industrial en su país– cómo las

ideas innovadoras fracasaban por no tomar en cuenta (o, más bien, ignorar) la existencia de iones en las soluciones acuosas, independientemente del paso o no de la corriente eléctrica.

Para ilustrar esto, tomemos el ejemplo de la celda electrolítica cuyo esquema se reprodujo en la cubierta del libro de Cœuret (1992), y que se presenta aquí en la figura 3. Este concepto de celda viene de una patente francesa tomada por Hulin (1893/1894) al terminarse el siglo XIX. Para producir cloro y sosa por electrólisis de soluciones acuosas de NaCl, con vista a satisfacer las necesidades de las industrias papeleras de la zona, su inventor imaginó una celda en la cual el cátodo era poroso como para permitir la extracción inmediata de los productos catódicos, es decir en este caso el hidróxido de sodio, y entonces evitar su mezcla con el electrolito aún no transformado. Debido a una diferencia de nivel entre los dos compartimientos de la celda (figura 3), el cloruro de sodio en fase acuosa fluía de la derecha a la izquierda a través del cátodo poroso, y se transformaba en hidróxido de sodio diluido; al no mezclar este último con el cloruro de sodio alimentado a la celda se evitaba la formación de hipoclorito de sodio. El lector notará que la fórmula química del producto (el hidróxido de sodio diluido) que sale por desborde del compartimiento catódico es NaO,HO y no NaOH. Esto viene del hecho que, en 1893, Hulin razonaba todavía según el concepto químico de los equivalentes, y con un peso atómico de 8 en vez de 16; HO era el agua y NaO el protóxido de sodio.

Pionera en cuanto al uso de electrodos porosos, la celda de la figura 3 no tuvo éxito para la aplicación proyectada; probablemente eso fue por la doble razón que Hulin, al desconocer la disociación iónica y entonces la conducción iónica dentro de los poros del cátodo poroso, no pensaba que la reacción pudiera ocurrir dentro de los poros mismos –pensaba que sólo ocurría en el límite del cátodo enfrentado al ánodo– y también porque no consideraba la evolución catódica de hidrógeno (¡justamente dentro de los poros!). Entonces, el aparente fracaso de esta celda –que, sin embargo, debe probablemente considerarse como la primera usando electrodo poroso percolado– en aquel tiempo, venía a demostrar, como un ejemplo más, la validez de la teoría de Arrhenius. Otros esquemas de celdas usando electrodos porosos de este tipo figuraban en la patente de Hulin. El lector interesado por comentarios más detallados sobre esta patente podría dirigirse a cualquiera de los libros

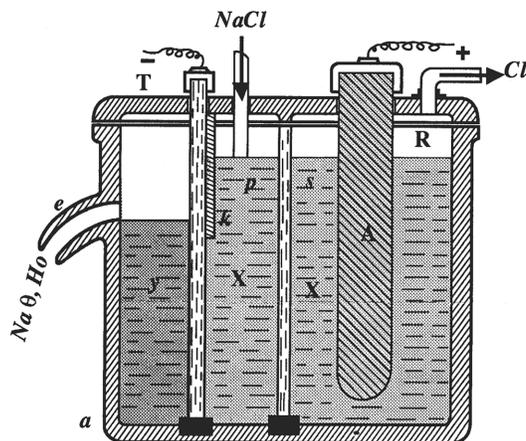


Figura 3. Esquema de la principal celda de la patente francesa de Hulin (1893/1894)

de Cœuret publicados en 1992 y 2003, libros que dedican a esa patente el anexo de un capítulo.

En un artículo (Cœuret, 1993) se mostró que patentes de la misma época contienen ejemplos similares que, a la vez, revelan cuán ingeniosos fueron sus inventores y el desconocimiento de la teoría de la disociación iónica. Después de la aceptación (que no fue tan fácil) de la teoría de Arrhenius, punto de partida de la química moderna, la electroquímica tuvo progresivamente su desarrollo industrial, como campo de aplicación de la electricidad en el sector de la química [diríamos que en la época de iniciación al fin del siglo XIX, se trataba más de electro-química que de la electroquímica que hoy conocemos y que se ha de ver como disciplina en general, es decir no únicamente dedicada a hacer química gracias a reacciones electrónicas]. Las plantas electrolíticas eran nada más que plantas químicas, combinando operaciones unitarias (de tipo físico o mecánico) con procesos unitarios sedes de transformaciones electroquímicas.

Si la electroquímica industrial se desarrolló luego en el siglo XX, como se sabe, cabe hacer notar que se habló de Ingeniería Electroquímica sólo alrededor de 1970.

La ingeniería electroquímica, rama de la ingeniería de procesos

La denominación “Ingeniería Electroquímica” apareció después que el concepto de fenómenos de transporte diera, en ingeniería química, la base analítica necesaria para lograr un mejor diseño de los equipos y para facilitar la continuidad de los procesos. Poco a poco se particularizó ese concepto de fenómenos de transporte en el campo de la electroquímica; el famoso libro de Levich (1962) fue la primera marca de esa particularización, seguido un poco más tarde por el libro de Newman (1973). Alrededor de 1970, la situación económica en los países avanzados hizo que, por necesidad, se buscaran nuevos avances de la electroquímica industrial. Grupos de investigadores en ingeniería química formados en fenómenos de transporte se dedicaron a abrir así nuevos campos de investigación, lo que contribuyó, poco a poco, a que se cristalicen grupos dedicados a la aplicación específica de los conceptos de la ingeniería química en el campo de la electroquímica industrial. Es de esta manera que, en pocos años, y como lo demostraron los libros publicados posteriormente, la Ingeniería Electroquímica llegó a ser, para los procesos electroquímicos, el

equivalente de la Ingeniería Química para los procesos químicos.

Conviene indicar que, debido también a las necesidades económicas del momento, aparecieron progresivamente otros campos de aplicación de la metodología desarrollada originalmente para la Ingeniería Química –y sobre todo para el sector petroquímico–, dando lugar a otras ingenierías, “hijas” de esta Ingeniería Química, como lo son la Ingeniería Bioquímica, la Ingeniería Sanitaria o del Medio Ambiente, etcétera. Hoy día, la tendencia es llamar “Ingeniería de Procesos” a la metodología y las bases analíticas comunes a todas estas ingenierías particulares. La figura 4 pone de manifiesto el aspecto central de la Ingeniería de Procesos, asignándole la función de un “depósito de metodología” conectado a toda una red periférica de sectores de aplicación, los cuales se identifican con las diferentes ingenierías de transformación físico-química de la materia y de la energía. Cada uno de estos sectores tiene, y conserva, sus características propias, pero es evidente que existe la posibilidad de interconectarlos a través de la Ingeniería de Procesos. De esta forma, por ejemplo, la Ingeniería Electroquímica puede tener relación y aplicarse a la Ingeniería Bioquímica, a la Ingeniería del Medio Ambiente, etc., y viceversa. Más exactamente, el surgimiento de la Ingeniería Electroquímica se dio dentro de un contexto de economías de materias primas metálicas, de protección del medio ambiente, así como también de economía de energía de origen petrolero. Una vez producida (es decir sin tomar en cuenta su origen nuclear en muchos de los casos), la energía eléctrica aparecía como una forma no contaminante de energía que permitía, a través de la electroquímica, fabricar productos químicos, almacenar o producir energía, extraer metales de licores de lixiviación de minerales metálicos pobres o de desechos metálicos, así como también recuperar los metales contaminantes o caros contenidos en soluciones industriales de varios tipos (efluentes, soluciones de enjuague en las plantas de tratamiento de superficies, etc.).

Ese contexto hizo que el esfuerzo de los investigadores se orientara de inmediato hacia ciertos temas. Entre los principales se puede citar:

- el tratamiento electroquímico de soluciones diluidas con o sin recuperación de metal;
- la electrosíntesis orgánica de compuestos, y particularmente los de alto valor agregado;
- la producción electrolítica de hidrógeno por electrólisis del agua;

- las pilas de combustible para generar energía, por ejemplo a partir de hidrógeno y oxígeno;
- la electrodiálisis.

Fue de esta manera que, formados en fenómenos de transporte, cuya aplicación en electroquímica se logró gracias a los físico-químicos, los investigadores de laboratorios de ingeniería química abordaron los problemas ingenieriles de la electroquímica, incorporando entonces las particularidades que le están ligadas (nociones de corriente eléctrica y de potencial eléctrico, por ejemplo), iniciando así la Ingeniería Electroquímica. El problema que se planteaba al nivel de la aplicación más intensiva de la electroquímica en la industria, era que las soluciones a tratar eran de muy baja concentración para que su tratamiento se pudiera hacer usando las celdas existentes, de tal manera que se necesitaban esfuerzos previos de investigación en ingeniería, de lo que el electroquímico no podía hacerse cargo.

La corriente máxima I_{\max} (expresada en amperios, A) admisible por un electrodo de área A_e (expresada en m^2) en el cual se produce la transformación electroquímica de los iones A de un electrolito, poniendo en juego v_e electrones por mol, está dada por:

$$I_{\max} = \bar{k}_d A_e v_e F C_{A_{\infty}}$$

donde F ($\approx 96500 \text{ C mol}^{-1}$) es la constante de Faraday, $C_{A_{\infty}}$ la concentración (expresada en mol m^{-3}) de los iones A en el seno del electrolito, y \bar{k}_d el coeficiente promedio de transporte de materia (expresado en m s^{-1}) por difusión-convección desde el electrolito hacia el electrodo (o viceversa). A un valor bajo de la concentración $C_{A_{\infty}}$ corresponde un valor bajo de la intensidad má-

xima (es decir que da lugar a una baja producción), salvo si se puede aumentar el coeficiente de transporte de materia y/o la superficie A_e del electrodo.

De este último comentario fluyen las dos principales orientaciones que tomaron las investigaciones:

- 1) *aumentar \bar{k}_d* significaba reducir, gastando energía (mecánica, de vibración, etcétera), el espesor de la resistencia difusional al nivel del electrodo, es decir hacer más turbulentas las capas líquidas inmediatamente vecinas al electrodo. Varias celdas, consideradas a priori como de nueva generación, aparecieron en esta categoría;

- 2) *aumentar A_e sin aumentar mucho el volumen de electrodo*, lo que se traducía en aumentar la superficie de electrodo por unidad de volumen de éste. Esto orientaba hacia celdas del tipo filtro-prensa y hacia el uso de electrodos porosos. Un electrodo poroso es un electrodo constituido por un material electródico de textura porosa (tipo lecho fijo granular, por ejemplo) que puede estar percolado por el electrolito mismo, haciendo que la transformación electroquímica pueda producirse durante el tiempo de residencia del electrolito dentro del medio poroso. Con estos electrodos porosos aparecieron nuevos problemas teóricos para que su descripción fuese posible. La metodología de la Ingeniería Química, incluyendo los fenómenos de transporte, permitió abordar su descripción teórica (distribución de corriente y de potencial) con vista a proponer soluciones matemáticas para diseñar los. La analogía entre la competitividad entre reacción electroquímica (heterogénea) y conducción iónica dentro de los poros del electrodo poroso, y la competitividad entre reacción química heterogénea y difusión molecular de materia dentro del poro de un catalizador en catálisis heterogénea, hizo que se pudiera trasponer soluciones teóricas existentes. Si entre 1970 y la fecha, ese tema de los electrodos porosos, percolados o no, ha avanzado mucho, sigue siendo todavía objeto de investigación, sobre todo como consecuencia de la aparición progresiva de nuevos materiales para este tipo de electrodos.

Algunas celdas estudiadas y propuestas por los investigadores pueden considerarse de nueva generación en cuanto a los fundamentos científicos que las generaron o apoyaron:

- el aumento de \bar{k}_d puede obtenerse usando métodos más o menos sofisticados: impacto de cho-

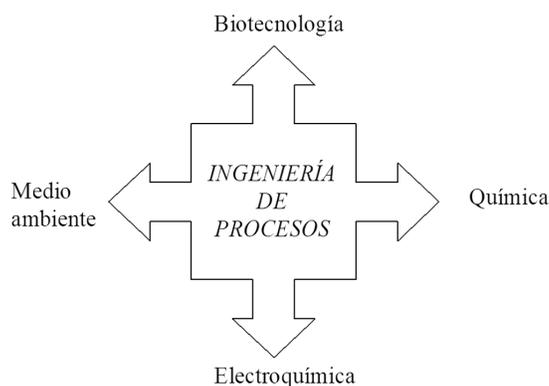


Figura 4. La Ingeniería de Procesos, 'depósito de metodología' para las diferentes ingenierías de transformación físico-química de la materia y de la energía

rros, flujo de una película descendente de electrolito por debajo de un electrodo de metal desplegado actuando como promotor de turbulencia, hidrodinámica especial, etcétera;

- Electrodo Poroso Percolado (EPP) pueden encontrarse bajo la forma de lecho fijo granular, de apilamiento de rejillas de metal desplegado o de hojas de espuma metálica, etcétera;
- se propuso también celdas de tipo enrollado, ya sea de hojas espaciadas por una tela promotora de turbulencia, ya sea de rejillas espaciadas por una tela separadora porosa.

Al observador, a veces esos conceptos de celdas podrían parecerle muy innovadores. Sin embargo, si uno consulta patentes del último decenio del siglo XIX, puede darse cuenta de que algunos de entre esos conceptos ya habían sido imaginados en aquella época, a pesar de que, como dicho anteriormente, no lograron tener éxito por muchas razones (desconocimiento de la teoría de Arrhenius, reacción electroquímica mal elegida y/o de conocimiento erróneo, escasez de materiales de electrodos y particularmente de ánodos). Un buen ejemplo es el electrodo poroso percolado que apareció en la patente de Hulin; su descripción matemática fue abordada aproximadamente más de setenta años después sin que, por lo menos aparentemente, se supiera de la anterioridad intelectual de Hulin al respecto. La consulta histórica de patentes pone en evidencia que hay otros ejemplos de este tipo.

Al principio de la década de los sesenta se esperaba mucho de los procesos electro-orgánicos, sobre todo con vista a elaborar compuestos de alto valor agregado. El control del potencial de electrodo se veía como un medio para producir selectivamente esos compuestos. Sin embargo, hasta hace poco se habían difundido pocos resultados positivos obtenidos. Era como si fuera un aparente fracaso que podía atribuirse a la complejidad de estos procesos, a la particularidad de ciertos electrolitos, etc., a pesar de que la “ingeniería de los procesos electro-orgánicos” llegó a estar presentada en libros como por ejemplo el de Scott (1991). El problema de cambio de escala entre la micro-celda de laboratorio (¡Si no es el estudio a escala del disco rotatorio!) y la celda de tamaño piloto puede haber sido determinante en el aparente fracaso constatado. Sin embargo, la confiabilidad en el mundo industrial hace que no suelen darse a conocer tanto éxitos como fracasos en lo relacionado a investigaciones de interés comer-

cial, dado que intereses económicos están en juego. Hay procesos electro-orgánicos funcionando, pero si frecuentemente no se sabe, puede ser porque conviene que no se sepa.

A partir de los años 1960/1970, hubo un esfuerzo notable para llegar a proponer electrodos granulares como los de lecho fluidizado (Proceso AKZO), de lecho denso y móvil o circulante (Proceso ANGLONOR), de lecho fijo (Celda ENVIRO), de lecho fijo pulsado (Proceso ORDOC), entre los principales. Como el lector interesado lo podría leer en los libros del autor (Cœuret, 1984, 1992 y 2003), rápidamente se tuvo que reconocer que sólo las texturas granulares de tipo lecho fijo eran de uso posible como electrodos, y se tuvo que abandonar la idea de aplicar como tales las demás texturas. Desgraciadamente, un lecho fijo que recupera un metal se colmata progresivamente. Para una recuperación continua la pulsación del lecho fijo granular apareció como interesante para evitar la sinterización. Sin embargo, el funcionamiento como electrodo recuperador sólo podía verse durante el periodo de actuación como lecho fijo y no durante el corto instante de puesta en fluidización. No era tan simple la cosa para los investigadores. Al principio, la idea de electrodo granular pulsado fue aplicada en Electrodo Poroso Percolado de configuración axial o paralela (corriente eléctrica fluyendo paralelamente al electrolito), la cual no era adecuada para el tratamiento de caudales altos. Recientemente la idea parece haber sido extendida a sistemas de configuración perpendicular o radial sin que todavía se sepa bien de sus aplicaciones. Es complejo el proceso de recuperación continua sobre granos (deben ser bastante esféricos) que se mueven y que crecen en tamaño por depósito electroquímico.

En cuanto a la recuperación discontinua por depósito electroquímico sobre lechos fijos, se tiende actualmente al uso de cátodos de fieltros de carbono o de grafito.

Simultáneamente a estas investigaciones sobre electrodos porosos de varios tipos, se logró describir matemáticamente la distribución de potencial de electrodo para distintas configuraciones y diferentes condiciones de control del proceso electroquímico (control cinético, mixto, difusional). Fue gracias a esos trabajos teóricos que se construyó gran parte de los aspectos básicos de la ingeniería electroquímica.

Hubo una evolución en el tiempo de los tipos de materiales para electrodos porosos percolados: granos y telas metálicas, granos de grafito, rejillas de

metal desplegado, fieltros y tejidos de carbono o de grafito, espumas metálicas, carbón vítreo reticulado (R.V.C.). Generalmente esa evolución se debió a la aparición misma de esos materiales en el mercado. Sin embargo, aunque a nivel de laboratorio muchos en esa lista pueden usarse, el número de materiales que realmente tienen un interés industrial es limitado. Entre estos, conviene subrayar los apilamientos de rejillas de metal desplegado y las espumas metálicas.

Vale la pena insistir un poco sobre la espuma metálica que, hoy día, está comercialmente disponible con varios metales (entre los principales: Ni, Cu, Au, Ag, Pb), y que es probablemente el material más prometedor para pequeñas celdas, debido a su alta superficie específica y su fácil empleo. Si el carbón vítreo reticulado (o R.V.C.) se parece estructuralmente a una espuma metálica, es un material frágil y no es fácil del todo conectarlo a una toma de corriente, de tal manera que su uso podría limitarse a trabajos de bancada.

En la figura 5 se ve una espuma de níquel de *Grado* 100 [por *Grado* se entiende *número de poros por pulgada lineal*] con un coeficiente de ampliación de 30. Se nota que es una estructura de alvéolos yuxtapuestos como si fuera espuma de jabón, e interconectadas. La porosidad es grande y cercana de 98%. Para espuma de níquel, se ha establecido experimentalmente la siguiente relación entre el *Grado* y la superficie específica por unidad de volumen total, a_e , [expresada en m^{-1}]

$$a_e = 100 \text{ (valor del Grado)}$$

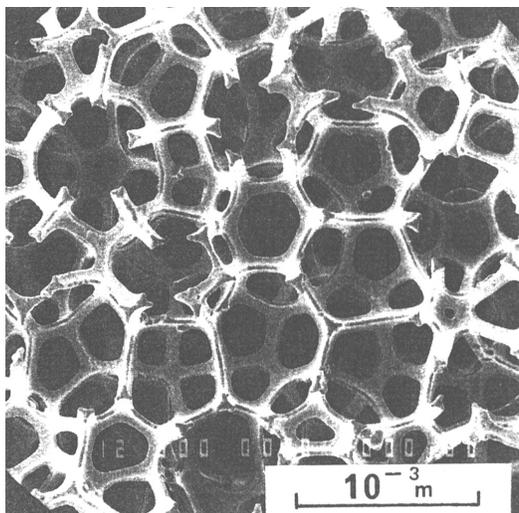


Figura 5. Espuma de níquel de Grado 100 (microscopía electrónica).

lo que indica que $a_e = 10,000\text{m}^{-1}$ para la espuma de *Grado* 100 de la figura 5.

La tabla 1 da intervalos de valores del área específica a_e [área de electrodo por unidad de volumen del conjunto (material + vacío) del medio poroso] y valores de la porosidad media o fracción de volumen disponible para el electrolito, $\bar{\epsilon}$. Se puede notar que estos dos parámetros pueden variar bastante de un material al otro. Si la espuma es interesante para pequeñas celdas, el metal desplegado es más adecuado para celdas de mayor tamaño.

El problema determinante en el uso de los electrodos porosos se basa en el hecho de que el área realmente utilizada para la reacción electroquímica puede ser muy inferior al área geométrica. La profundidad útil (es decir la que está penetrada por las líneas de corriente) de un electrodo poroso resulta, como dicho anteriormente, de una competitividad entre cinética de la reacción electroquímica heterogénea y conducción iónica en el electrolito de los poros [esto Hulin, no se lo imaginaba].

Además del gran área geométrica, la circulación forzada del electrolito a través del medio poroso que constituye el electrodo mejora el transporte de materia por promoción de turbulencia: el flujo de percolación, generalmente lento para lograr una tasa de conversión elevada por paso, se vuelve localmente flujo con torbellinos generados por los obstáculos que constituye la estructura porosa.

También los electrodos porosos tienen aplicación dentro de las pilas de combustible, tema que es de gran actualidad. En el caso de pilas con electrolito líquido, por ejemplo, se trata de lograr un contacto trifásico (gas-sólido-líquido) dentro de un material poroso de propiedades electrocatalíticas, con vista a generar electrones, es decir electricidad. Cada uno sabe que en el contexto actual de protección del medio ambiente, la pila de combustible como generador de energía eléctrica constituye un dispositivo interesante. Sin embargo, muy a menudo se subraya que el electrodo poroso sigue necesitando más investigación.

Conclusiones

La Ingeniería de los Procesos Electroquímicos, o Ingeniería Electroquímica, surgió de la Ingeniería Química cuando ésta había logrado su madurez científica. Esta disciplina Ingeniería Electroquímica, que completa la disciplina Electroquímica, tiene como objetivo el diseño de las plantas electroquímicas y en ellas particularmente la celda electroquímica (o reactor electroquímico). Con varios libros que

le están dedicados, la Ingeniería Electroquímica aparece hoy, claramente, como una rama particular del campo de aplicación de la Ingeniería de Procesos. Esta última consiste en un conjunto de metodologías útiles en varios sectores, los cuales se identifican con las diferentes ingenierías de transformación fisicoquímica de la materia y de la energía.

Sin menospreciar los alcances en el campo de la química orgánica y sus aportes en la maduración de la disciplina “Ingeniería Electroquímica”, parece que es en el campo de la electroquímica mineral, y sobre todo en la hidrometalúrgica, que el esfuerzo ha sido el más fructífero hasta ahora.

La preocupación por la protección del medio ambiente en casi todos los países del mundo incita, cuando se trata de líquidos contaminantes, a tomar en consideración las tecnologías electroquímicas. Rama todavía joven de la Ingeniería de Procesos, la Ingeniería Electroquímica verá extenderse sin duda su campo de aplicaciones.

Como lo habrá notado el lector, el presente artículo se preocupa principalmente de la aplicación industrial, ya que éste es el verdadero objetivo de la disciplina. Esto no debe hacer olvidar que los conceptos y los conocimientos de la disciplina tienen aplicación en otros campos que el de la electroquímica industrial, como lo vimos anteriormente con la presentación de la figura 4. Si la disciplina es madura, las bases científicas han de ser consolidadas y difundidas gracias a los docentes e investigadores, tanto de ingeniería química misma como de electroquímica aplicada. Los de la última disciplina, tal vez menos preparados para contestar a preguntas ingenieriles, empezaron a abrirse hacia la ingeniería electroquímica, abordando temas de interés para el paso de sus resultados a la aplicación industrial. En efecto, se ha de notar que en las etapas de desarrollo hasta la planta, muy a menudo el aspecto ingenieril predomina sobre el aspecto puramente electroquímico. ▀

Bibliografía

- Bird, R.B., Stewart, W.E., y Lightfoot, E.N., *Transport Phenomena*, John Wiley and Sons, Nueva York (1960). Ed. en español: *Fenómenos de Transporte*, Ed. Reverté, Barcelona (1964).
- Cœuret, F., y Storck A., *Éléments de Génie Électrochimique*, Tec.-Doc. Lavoisier, Paris (1984; 2ª impresión 1993).
- Cœuret, F., *Introducción a la Ingeniería Electroquímica*, Ed. Reverté, Barcelona (1992).

Tabla 1. Valores del área específica a_e y de la porosidad media, para algunos materiales

MATERIAL	a_e [m ⁻¹]	$\bar{\varepsilon}$
metal fritado	70000	0.34
granos esféricos 0.2 < diámetro < 1 [mm]	2000 - 10000	0.4 (lecho fijo)
metal desplegado	500 - 10,000 (malla micro)	0.9
fieltros de grafito	180 - 300	0.95
espuma metálica; R.V.C.	3000 - 10000	0.98

- Cœuret, 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* (Paris), julio-agosto-septiembre p. 33-39, 1993.
- Cœuret, F., “De la ingeniería química a la ingeniería electroquímica”, en *Educación Química*, 7, 64-71, 1996.
- Cœuret, F., *Ingénierie des Procédés Electrochimiques*, Editions Ellipses, Paris (2003).
- Fahidy, T.Z., *Principles of Electrochemical Reactor Analysis*, Elsevier (1985).
- Goodridge, F., y Scott, K., *Electrochemical Process Engineering*, Plenum Press, Nueva York (1995).
- 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).
- Ismail, M.I. (ed.), *Electrochemical Reactors-Their Science and Technology*, part A, Elsevier (1989).
- Levich, V., *Physicochemical Hydrodynamics*, Prentice Hall (1962).
- Newman, J., *Electrochemical Systems*, Prentice Hall (1973).
- Pickett, D.J., *Electrochemical Reactor Design*, Elsevier (1ª ed. 1977; 2ª ed. 1979).
- Rousar, I., Micka, K., y Kimla, A., *Electrochemical Engineering*, Vol. I y II, Elsevier (1985).
- Scott, K., *Electrochemical Reaction Engineering*, Academic Press, London (1991).
- Valiente, A., y Stivalet, R.P., *El Ingeniero Químico ¿Qué hace?*, Ed. Alhambra Mexicana, México (1988).
- Walsh, F., *A first course in Electrochemical Engineering*, The Electrochemical Consultancy, Romsey, Hants, G.B. (1993).
- Wendt, H., y Kreysa, K., *Electrochemical Engineering*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (1999).