

CAMBIO DE ESCALA PARA UNA CELDA ELECTROQUÍMICA DE DOS DISCOS ENFRENTADOS CON FLUJO RADIAL LAMINAR DIVERGENTE

SCALE UP OF AN ELECTROCHEMICAL CELL OF TWO FACING DISKS WITH RADIAL DIVERGENT LAMINAR FLOW

F. Cœuret^{1*} y T.Z. Fahidy²

¹Lab. Thermocinétique, UMR CNRS 6607, E.P.U.N., B.P. 50609, 44306 Nantes Cedex 3, France.

²Dept. of Chemical Engineering, University of Waterloo, Waterloo, ON N2L 3G1, Canada.

Recibido 21 de Junio 2006; Aceptado 18 de Abril 2007

Resumen

Este trabajo muestra el aspecto académico del cambio de escala de una celda electroquímica de flujo radial divergente para un proceso electroquímico limitado por transferencia isotérmica de masa en condiciones de flujo laminar. El transporte de masa líquido-pared en esta celda se origina en el espacio capilar comprendido entre dos discos enfrentados ($2a$) que actúan como electrodos, dando un flujo radial laminar divergente a lo largo del radio R_2 , y a partir del orificio de entrada de radio R_1 situado en el centro de uno de los discos. Se usaron tres celdas de tamaños diferentes con un factor de escala que llegó a tomar el valor 12.5. Los cinco números adimensionales R_2/R_1 , $2a/(R_2-R_1)$, Re , \overline{Sh} y Sc , deducidos por análisis dimensional del problema de transporte de masa se relacionan de la siguiente manera :

$$\overline{Sh} = \text{constante} \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^\alpha \left(\frac{2a}{R_2 - R_1} \right)^\beta Re^\gamma Sc^{1/3}$$

donde la constante y los exponentes α , β y γ se obtienen experimentalmente. Se plantea un problema de cambio de escala, cuyo objetivo es el conservar un determinado comportamiento para cualquier tamaño de celda. Esto se logra mediante la correlación empírica antes descrita y establecida para un determinado intervalo de variación del factor de escala. Los resultados experimentales se comparan también con una solución teórica aproximada de forma analítica. A través del ejemplo de la celda de flujo divergente se pone en evidencia los aspectos ingenieriles en problemas de cambio de escala, las dificultades de éste, y cómo, en ausencia de una solución teórica rigurosa, el experimentador puede correlacionar sus datos para la aplicación a escala industrial.

Palabras clave: celda electroquímica, discos enfrentados, transporte de masa, cambio de escala.

Abstract

The paper deals with theoretical aspects of scaling-up, and concerns an electrochemical cell working under isothermal mass transport control. The cell contains two closely-facing parallel circular disk electrodes [radius R_2 , separation distance $2a$]. The electrolyte enters the cell through a central circular hole [radius R_1] in one disk and flows radially between the disks in the laminar flow regime. Specifically, the work deals with the effect of the scale on stationary liquid-to-disk mass transport. Three cells were used, allowing a maximum scale factor of 12.5. Dimensional analysis of the mass transport problem yields the five dimensionless numbers R_2/R_1 , $2a/(R_2-R_1)$, Re , \overline{Sh} and Sc , to be correlated as:

$$\overline{Sh} = \text{constant} \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^\alpha \left(\frac{2a}{R_2 - R_1} \right)^\beta Re^\gamma Sc^{1/3}$$

where the coefficient and the numerical exponents α , β , γ , follow from experiments. It is shown how scale-up is approached when the objective is to conserve the mass transport characteristics of a cell. The values of the dimensionless numbers calculated from the experimental data allow the establishment of an empirical correlation valid in a given range of the scale factor, and comparison with an approximate theoretical analytical solution. It is shown how scaling-up considerations are handled, what difficulties are and how, in the absence of a rigorous theoretical solution, experimental results can be employed for cell design up to industrial scale.

Keywords: electrochemical cell, opposite disks, mass transport, scale-up.

* Autor para la correspondencia: E-mail: francois.coeuret@univ-nantes.fr; terueoc@wanadoo.fr

1. Introducción

Tener datos sobre el transporte de materia líquido/pared es algo necesario para llegar a diseñar celdas electroquímicas (Fahidy, 1985). En los últimos años, trabajos experimentales relativos al transporte de materia en la celda electroquímica que se conoce como la *capillary gap cell* (Beck y Guthke, 1969; Ashworth y Jansson, 1977) fueron hechos por Cœuret y Fahidy (2001, 2002), y más recientemente por Fahidy y Cœuret (2003). En este tipo de celda tiene lugar un flujo radial laminar divergente entre dos discos enfrentados muy vecinos uno de otro y que actúan como los dos electrodos de la celda. Si no se conoce la solución teórica rigurosa y analítica del problema de transporte de materia en este tipo de celda, una solución teórica aproximada para el transporte local de materia y altos números de Schmidt fue obtenida por Dworak y Wendt (1976).

El objetivo de este trabajo es examinar experimentalmente el problema del transporte de materia entre electrolito y electrodo en celdas de varios tamaños y, como segundo aspecto, comparar los datos con la solución teórica aproximada antes mencionada. Por lo general, los trabajos experimentales de investigación en ingeniería electroquímica llevados a cabo a escala de bancada se hacen con un solo equipo, de tal modo que el efecto de escala casi nunca se estudia al nivel del laboratorio. Dado la importancia de un buen cambio de escala en el proceso de investigación/desarrollo, conviene dedicar esfuerzos a verificar que las correlaciones que se usan para el diseño se conservan en el aumento de escala. Aquí se ha tomado el caso de la *capillary gap cell* cuyos autores (Beck y Guthke, 1969) la propusieron para electrosíntesis orgánica.

2. Números adimensionales para el cambio de escala.

En la celda considerada y esquemáticamente representada en la Fig. 1, cada electrodo es un disco anular definido entre los radios R_1 y R_2 . Si se acepta que sólo interviene la difusión molecular en la dirección de la coordenada z hacia un disco (que sería el electrodo de trabajo), en régimen permanente, el balance diferencial de materia se escribe

$$v_z \frac{\partial C}{\partial z} + v_r \frac{\partial C}{\partial r} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (1)$$

Cuando una ecuación de derivadas parciales como la Ec. (1) no tiene solución teórica, lo que ocurre en la mayoría de los casos, el ingeniero químico/electroquímico busca cuales son los números (o bloques de variables) adimensionales que describen el problema. Una vez obtenidos, estos números se emplearán para correlacionar los datos experimentales. En ingeniería química se conocen varios métodos para establecer los números

adimensionales que corresponden a un determinado problema, según si éste tiene o no una base teórica (Johnstone y Thring, 1957; Bird y col., 1964). Si aquí se definen las siguientes variables reducidas:

$$r' = \frac{r - R_1}{R_2 - R_1}; z' = \frac{z}{2a}; v_r' = \frac{v_r}{v_{R_1}}; v_z' = \frac{v_z}{v_{R_1}}; C^* = \frac{C - C_i}{C_E - C_i}$$

y se sustituyen en la Ec. (1), se obtiene:

$$\begin{aligned} & \frac{v_{R_1} (C_E - C_i)}{2a} v_z' \frac{\partial C^*}{\partial z'} \\ & + \frac{v_{R_1} (C_E - C_i)}{R_2 - R_1} v_r' \frac{\partial C^*}{\partial r'} \quad (2) \\ & = D \frac{C_E - C_i}{4a^2} \frac{\partial^2 C^*}{\partial z'^2} \end{aligned}$$

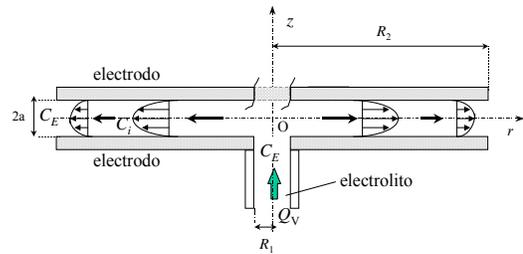


Fig 1. Celda electroquímica con flujo radial laminar divergente.

Como la Ec. (2) es homogénea, sus tres términos tienen la misma dimensión que se confunde con la de sus coeficientes respectivos ya que las demás variables son reducidas, es decir que no tienen dimensión. La relación dos a dos de estos tres términos hace aparecer los números adimensionales de tal modo que se deduce:

$$\frac{2a}{R_2 - R_1} \text{ de la relación del 1}^{er} \text{ al 2}^{do} \text{ término;}$$

$$\frac{v_{R_1} R_1}{v} \cdot \frac{2a}{R_1} \cdot \frac{v}{D} \text{ de la relación del 1}^{er} \text{ al 3}^{er} \text{ término;}$$

mientras que la relación del 2^{do} al 3^{er} término daría:

$$\frac{v_{R_1} (2a)^2}{D(R_2 - R_1)} = \frac{v_{R_1} R_1}{v} \cdot \frac{2a}{D} \cdot \frac{2a}{R_1 (R_2 - R_1)}$$

Es así que aparecen los cuatro números adimensionales siguientes:

$$\frac{2a}{R_2 - R_1}; \frac{2a}{R_1}; Re = \frac{v_{R_1} R_1}{v}; Sc = \frac{v}{D}$$

a cuya lista conviene de sumar el (o los) número(s) que provienen de la toma en consideración de la ecuación que expresa el flujo medio de materia que atraviesa la interfase (la superficie del electrodo) de área $A_e = \pi(R_2^2 - R_1^2)$, es decir, si la concentración C_E se conserva en todo el reactor (caso de estudios de transporte de materia en laboratorio):

$$\bar{k}_d A_e (C_E - C_i) = D \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=a} \cdot A_e$$

$$= D \frac{A_e}{R_2 - R_1} \int_{R_1}^{R_2} \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=a} dr$$

Introduciendo los cambios de variables dados previamente, se obtiene:

$$\bar{k}_d (C_E - C_i) = \frac{D(C_E - C_i)(R_2 - R_1)}{(R_2 - R_1)(2a)} \int_0^1 \left(\frac{\partial C^*}{\partial z'} \right)_{z'=1} dr'$$

lo que pone en evidencia el grupo adimensional $\bar{k}_d 2a / D$, que representa un número de Sherwood promedio.

Finalmente, aplicando este método clásico de análisis dimensional a partir de una ecuación de derivadas parciales de balance de materia, se establece que el problema de transporte de materia está descrito por una función entre cinco números adimensionales:

- dos números geométricos: $2a/(R_2 - R_1)$ y $2a/R_1$,
- el número de Reynolds: $Re = \frac{v_{R_1} R_1}{\nu}$,
- el número de Schmidt: $Sc = \frac{\nu}{D}$,
- el número de Sherwood: $\bar{Sh} = \frac{\bar{k}_d 2a}{D}$.

En otras palabras, los resultados experimentales de transporte de materia deberían estar correlacionados, ya sea analíticamente, ya sea empíricamente, por una función del tipo

$$\bar{Sh} = \text{función de} \left(\frac{2a}{R_2 - R_1}; \frac{2a}{R_1}; Re; Sc \right) \quad (3)$$

Una solución local analítica aproximada, obtenida por Dworak y Wendt (1976), fue integrada analíticamente entre $r = R_1$ y $r = R_2$ por Cœuret y Fahidy (2002), para dar la siguiente expresión del número de Sherwood medio:

$$\bar{Sh} = \left[(2.49) \left(\frac{\pi}{2} \right)^{1/3} \frac{\left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{1/3} - 1}{\left(\frac{R_2}{R_1} - 1 \right)^{1/3}} \right] \left[\left(\frac{2a}{R_2 - R_1} \right)^{1/3} \left(Re \cdot Sc \cdot \frac{2a}{R_2 - R_1} \right)^{1/3} \right] \quad (4)$$

Se observa que la Ec. (4) contiene los números adimensionales previamente obtenidos a partir de la Ec. (1) pero con la diferencia que el factor geométrico R_2/R_1 aparece en lugar de $2a/R_1$. Esto no tiene importancia dado que dos números adimensionales pueden combinarse para dar otro número adimensional, y que la forma de los números deducidos por análisis dimensional depende del método utilizado. Para simplificar y permitir una comparación de nuestros datos con la Ec. (4), se adoptará aquí en adelante los mismos números adimensionales que los establecidos por Dworak y Wendt (1976) por la vía analítica, es decir que se

expresarán los resultados experimentales de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\bar{Sh} = \text{constante} \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^\alpha \left(\frac{2a}{R_2 - R_1} \right)^\beta Re^\gamma Sc^{1/3} \quad (5)$$

3. Aplicación al cambio de escala.

3.1 Criterios para las semejanzas

Se recordará que la condición necesaria para que dos sistemas geoméricamente semejantes sean semejantes en su comportamiento (que sea dinámico, o térmico, o para el transporte de materia), es que cada número adimensional que interviene en la descripción tenga el mismo valor para estos dos sistemas (Johnstone y Thring, 1957). Aplicando esta regla para el transporte de materia isotérmico en dos celdas electroquímicas como la de la Fig. 1, habrían entonces que cumplirse sucesivamente, y en el orden indicado.

- La *semejanza geométrica*, la cual sería completa si el factor de escala - o relación del valor de una magnitud al valor de la misma magnitud en la otra escala - fuera el mismo para todas las dimensiones. En el presente caso, sería si :

$$\frac{(R_2)_2}{(R_2)_1} = \frac{(R_1)_2}{(R_1)_1} = \frac{a_2}{a_1} = \text{constante}$$

- La *semejanza dinámica*, que se basaría, si las fuerzas de gravedad pudieran despreciarse, sobre la constancia de cada uno de los cuatro números adimensionales siguientes

$$\frac{R_2}{R_1}; \frac{2a}{R_2 - R_1}; Eu = \frac{P_1 - P_2}{\frac{1}{2} \rho (v_{R_1})^2}; Re = \frac{v_{R_1} R_1}{\nu}$$

los cuales se obtendrían, sin dificultad alguna, de la misma manera que para el caso de la Ec. (1), pero esta vez trabajando sobre las ecuaciones que describen la dinámica del flujo estacionario entre los dos discos (Horn, 1979). Si la semejanza geométrica está satisfecha, entonces la semejanza dinámica se reduce a la constancia de *Re* cuyo valor determina el número de Euler, *Eu*.

- La *semejanza* desde el punto de vista del *transporte de materia* en promedio resultaría así satisfecha.

En un programa real de desarrollo, habría luego que considerar la *semejanza eléctrica* que se relaciona con la distribución del potencial y de la corriente. Al final, el problema de semejanza en su conjunto aparece como complejo. Para cumplir con el objetivo didáctico del presente trabajo sobre el cambio de escala, se consideraron condiciones de limitación por el transporte de materia a las que corresponde la distribución terciaria. Sin embargo,

en la práctica las celdas electroquímicas suelen estar operadas por debajo de esas condiciones límites (distribución secundaria; distribución primaria), como se puede leer en libros específicos de ingeniería electroquímica.

3.2 Estudios experimentales

Tres celdas A (pequeña), B (mediana) y C (grande), cuya configuración obedece al esquema de la Fig. 1, fueron empleadas en experimentos de transporte de materia líquido-sólido, basándose sobre la aplicación del clásico método electroquímico de medición de los coeficientes de transporte de materia (Selman y Tobias, 1978); la reacción electroquímica utilizada fue la reducción del ion ferricianuro a partir de una mezcla de ferricianuro (0.005M) y de ferrocianuro (0.05M) de potasio en solución acuosa (0.5M) de hidróxido de sodio, y a temperatura constante (20°C para las celdas A y B; 30°C para la celda C). Los datos fisicoquímicos se muestran en la Tabla 1. Cabe indicar que dado que fueron experimentos llevados a cabo a una temperatura controlada constante, se implica la semejanza térmica después de ser satisfecha la semejanza dinámica.

Tabla 1. Valores de los datos fisicoquímicos a las dos temperaturas.

	20°C	30°C
$D \text{ m}^2 / \text{s}$	5.63×10^{-10}	7.4×10^{-10}
$\nu \text{ m}^2 / \text{s}$	1.07×10^{-6}	9.1×10^{-10}
$\rho \text{ kg} / \text{m}^3$	1033	1020

En la Tabla 2, que da valores del factor de escala (o relación de magnitud entre dos determinadas celdas), se notará que ese factor llega a tener el valor de 12.5 entre las celdas A y C, lo que es un valor grande para experiencias de laboratorio. La Tabla 3 da los valores tomados por los radios R_1 y R_2 que delimitan los electrodos, así como los valores

y/o los rangos (caso de Re) de variación de los números adimensionales cuyo valor determina el del quinto número adimensional \overline{Sh} .

Tabla 2. Factores de escala entre las celdas

	de A a B	de A a C	de B a C
sobre R_1	3	10	3.3
sobre R_2	2.25	12.5	5.6
Sobre a	1; 2; 3.2	2; 10	1 à 5

En lo relativo a la semejanza geométrica:

- se observa a partir de la Tabla 2, que el factor de escala pudo mantenerse aproximadamente constante en tres situaciones: al pasar de A a B (con un valor de 2 a 3), de B a C (con un valor del orden de 5) y de A a C (con un valor cerca de 10);
- y la Tabla 3 indica
 - que la relación R_2/R_1 se mantuvo casi constante;
 - que el número $2a/(R_2-R_1)$ fue variado, pero uno de sus valores (≈ 0.025) permite respetar el criterio de semejanza geométrica;
 - que los rangos cubiertos por los valores de Re más bien se complementan, salvo para una situación con las celdas A y B;
 - que Sc no se mantuvo constante, lo que se dio al uso de dos temperaturas.

4. Análisis y discusión.

4.1 Correlación de los datos para un cambio de escala adecuado

Una vez garantizada la semejanza geométrica entre dos celdas, es decir cuando el factor de escala es constante (Tabla 2), la semejanza en transporte de materia la cual exige previamente la semejanza dinámica (constancia de dos parámetros geométricos

Tabla 3. Valores tomados por los números adimensionales

	Celda A (pequeña) $R_1 = 0.1 \text{ cm}; R_2 = 2 \text{ cm}$	Celda B (mediana) $R_1 = 0.3 \text{ cm}; R_2 = 4.5 \text{ cm}$	Celda C (grande) $R_1 = 1 \text{ cm}; R_2 = 25 \text{ cm}$
R_2/R_1	20	15	25
$2a [\text{cm}]$	0.05 ; 0.1 ; 0.15	0.1 ; 0.16	0.1 ; 0.2 ; 0.3 ; 0.5
$2a/(R_2 - R_1)$	0.026 0.053 0.079	0.024 0.038	0.0042 0.0083 0.0125 0.0167 0.021
$Re = \frac{\nu R_1}{\nu}$	36 - 360 30 - 250 10 - 110	16- 1340 36 - 940	350 - 3500 320 - 4200 320 - 2100 540 - 1700 530 - 1700
$Sc = \nu / D$	1900	1900	1230

y de Re), la cual se resume, si se admite que Sc es constante, a la identidad de la relación entre \overline{Sh} , $2a/(R_2 - R_1)$, Re y Sc para la descripción del transporte de materia en todas las celdas del tipo considerado en el cambio de escala. En general, según sea la complejidad del problema, esta relación, que sería aquí la Ec. (5), puede ser teórica y analítica, o solamente empírica es decir resultar de la experiencia.

Aceptando *a priori* la regla, habitual para transporte de masa convectivo, que la influencia de Sc sobre \overline{Sh} es como $Sc^{1/3}$, el exponente γ de Re fue determinado para el valor $2a/(R_2 - R_1) \approx 0.025$ con los datos obtenidos con las tres celdas, representando, en coordenadas bilogarámicas (Fig. 2) las variaciones de $\overline{Sh}Sc^{-1/3}$ versus Re que fue variado globalmente entre 16 y 1700. Por análisis regresivo se deduce para γ valores entre 0.37 (celda A), 0.395 (celda C), y $\gamma = 0.326$ para el conjunto de datos. Aceptando como valor común $\gamma = 1/3$, se obtiene

$$\overline{Sh} = 0.189 (Re Sc)^{1/3} \quad (6)$$

con un coeficiente de correlación de 98.7 %, lo que permite concluir que $\gamma = 1/3$ es un valor representativo del comportamiento de las tres celdas A, B y C para el rango de condiciones hidrodinámicas consideradas (régimen laminar, con $16 \leq Re \leq 1700$).

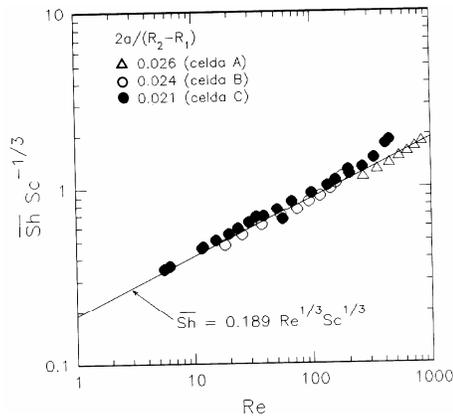


Fig. 2. Influencia de Re sobre el transporte de materia, para $2a/(R_2 - R_1) \approx 0.025$.

El exponente β se obtiene de la misma manera, representando esta vez, también en coordenadas logarámicas, los valores medios de $\overline{Sh}Sc^{-1/3} Re^{-1/3}$ en función de $2a/(R_2 - R_1)$ para cada familia de datos obtenidos usando la celda C para la cual el número $2a/(R_2 - R_1)$ fue variado suficientemente (Fig. 3). Fue necesario considerar aquí valores medios porque se tuvo que averiguar previamente que el exponente $\gamma = 1/3$ se aplicaba aún para valores de Re fuera del rango para el cual fue

determinado (Fig. 2). De ahí viene $\beta = 0.558$ con un coeficiente de correlación de 99.1 %.

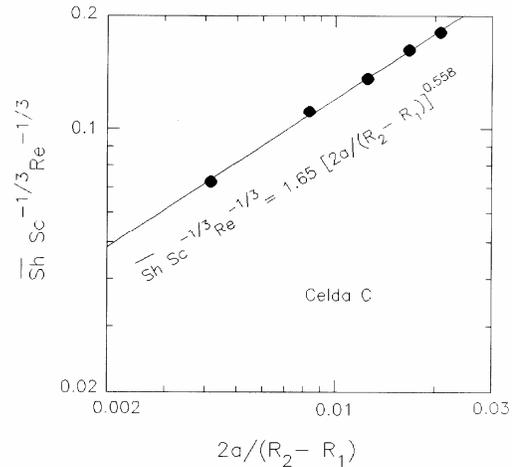


Fig. 3. Gráfico para determinar el valor del exponente β (Celda C).

A este nivel, se conocen los coeficientes γ y β adecuados para la correlación que es la Ec. (5), pero no se conoce el valor del exponente α dado que R_2/R_1 no fue variado. El lector comprenderá que no sería tan fácil hacer variar este parámetro geométrico, por el solo hecho de que R_2 no puede tomar valores grandes que harían excesivamente lento el flujo radial divergente entre los discos. Incluyendo entonces R_2/R_1 en el coeficiente numérico multiplicativo, se obtiene, gracias a una representación bilineal (Fig. 4), la correlación empírica siguiente que describe el conjunto de los datos con un coeficiente de correlación de 97 %:

$$\overline{Sh} = 1.65 \left(\frac{2a}{R_2 - R_1} \right)^{0.558} Re^{1/3} Sc^{1/3} \quad (7)$$

la cual obedece a la forma de la Ec. (5).

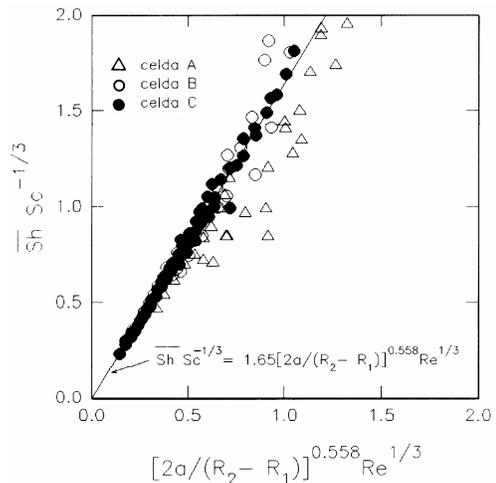


Fig. 4. Correlación general para el transporte de materia en las tres celdas.

La Ec. (7) es la que necesitaría el ingeniero electroquímico para desempeñar los cálculos de diseño de una celda real que le permita hacer experiencias de bancada a pequeña escala, esta vez en condiciones electroquímicas reales, es decir que no fuesen limitadas por el transporte de materia (Cœuret, 1992 y 2003). Así comienza por lo general la serie de etapas (mini-piloto, y luego piloto) del programa industrial de cambio de escala.

4.2 Comentarios

Lo que se acaba de presentar obedece al método clásico utilizado para establecer una correlación empírica de datos experimentales al nivel del laboratorio. Esto es general cuando el sistema no está soportado por un desarrollo teórico que conduce a una solución teórica analítica. En el presente caso, se tiene la suerte de disponer de una solución teórica aproximada (Ec. (4)), la cual entonces conviene comparar con la correlación empírica que es la Ec. (7).

En la Ec. (7), el producto $Re.Sc$ interviene a la potencia $1/3$, de manera conforme con la solución teórica conocida como la de Lévêque para el flujo laminar en un canal paralelepípedo (Pickett, 1979), y también de acuerdo con la Ec. (4). Sin embargo, si en ambas se destaca el término $(2a Re Sc / (R_2 - R_1))^{1/3}$, las Ecs. (4) y (7) difieren por sus coeficientes multiplicativos, los cuales contienen $2a/(R_2 - R_1)$ y/o R_2/R_1 .

Ahora, es interesante comparar cuantitativamente con la Ec. (4) los datos experimentales obtenidos, a pesar de que R_2/R_1 no fue variado. La Fig. 5 muestra que esta comparación es satisfactoria, salvo para la celda C para la cual hay algunas desviaciones.

Para ir más adelante en un estudio empírico es evidente que convendría hacer variar R_2/R_1 , aunque, como dicho anteriormente, sería algo difícil.

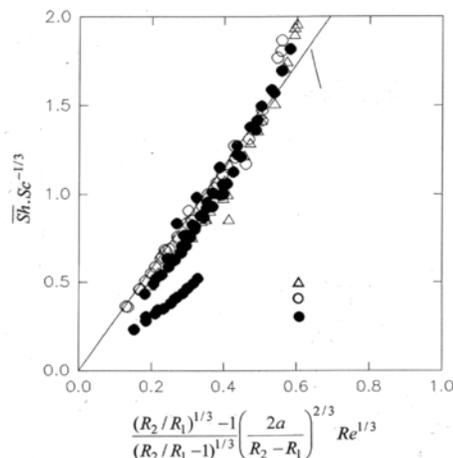


Fig. 5. Comparación de los datos con la Ec. (4).

Conclusiones

El ejemplo aquí tomado del flujo laminar divergente entre dos discos paralelos ha permitido poner de relieve aspectos relevantes de la ingeniería electroquímica: números adimensionales, elementos básicos del cambio de escala, estudio experimental de celdas de tamaños diferentes, correlación empírica, solución teórica analítica.

A través de este ejemplo el lector electroquímico no familiarizado con los aspectos ingenieriles podría comprender el interés y la utilidad del uso de los números adimensionales, no sólo para la descripción empírica de procesos que son difíciles de describir teóricamente, sino que estos números adimensionales están a la base del proceso de cambio de escala. En lo que aquí sería una de las primeras etapas de un proyecto de desarrollo de un reactor electroquímico abierto, aparece que la parte electroquímica es despreciable comparada con los aspectos ingenieriles.

Nomenclatura

- a semi espacio entre discos, m
- A_e área de la superficie de intercambio, m^2
- C concentración, $mol\ m^{-3}$
- C^* concentración adimensional
- C_E concentración de entrada, en $r = R_1$, $mol\ m^{-3}$
- C_i concentración sobre el electrodo, $mol\ m^{-3}$
- D coeficiente de difusión molecular, $m^2\ s^{-1}$
- Eu número de Euler
- I intensidad de la corriente límite, A
- \bar{k}_d coeficiente medio de transporte de materia, $m\ s^{-1}$
- Q_v caudal volumétrico de líquido, $m^3\ s^{-1}$
- R_1 radio interior del electrodo de disco, m
- R_2 radio exterior del electrodo de disco, m
- Re número de Reynolds
- r coordenada radial, m
- r' coordenada radial reducida
- Sc número de Schmidt
- \bar{Sh} número de Sherwood medio entre $r = R_1$ y $r = R_2$
- v_{R_1} velocidad media de flujo en $r = R_1$, $m\ s^{-1}$
- v_r velocidad radial en r , $m\ s^{-1}$
- $v_{r'}$ velocidad radial reducida
- v_z velocidad transversal, $m\ s^{-1}$
- z coordenada vertical en el espacio entre discos, m
- z' coordenada vertical reducida

Símbolos griegos

- α exponente en la Ec. (5)
- β exponente en la Ec. (5)
- γ exponente en la Ec. (5)
- ν viscosidad cinemática, $m^2\ s^{-1}$
- ρ densidad, $kg\ m^{-3}$

Referencias

- Ashworth, G.A. y Jansson, R.E.W. (1977). Mass Transfer and Pressure Distribution in Capillary Gap Cells. *Electrochim. Acta* 22, 1295-1299.
- Beck, F. y Guthke, H. (1969). Entwicklung neuer Zellen fuer elektro-organische Synthesen. *Chemie-Ing.-Techn.* 41, 943- 950.
- Bird, R., Stewart, W.E. y Lightfoot, E.N. (1964). *Fenómenos de Transporte*, Ed. Reverté, Barcelona.
- Cœuret, F. (1992). *Introducción a la Ingeniería Electroquímica*, 215-223, Ed. Reverté, Barcelona.
- Cœuret, F. y Fahidy, T.Z. (2001). Steady-state Mass Transport at Stationary Discs under Divergent Laminar Radial Flow Conditions. *Journal of Applied Electrochemistry* 31, 671- 676.
- Cœuret, F. y Fahidy T.Z. (2002). Transfert de Matière Liquide-Disque dans l'Écoulement Radial Divergent entre Disques Fixes de Grand Diamètre. *Entropie* (Paris) n°238, 30-37.
- Cœuret, F. (2003). *Ingénierie des Procédés Electrochimiques*, 203-212, Ellipses, Paris.
- Dworak, R. y Wendt, H.(1976). Hydrodynamics and Mass Transfer Within the Cylindrical Capillary Gap Electrolysis Cell., *Ber. Bunsen-Gessellschaft* 80, 77- 80.
- Fahidy, T.Z. (1985). *Principles of Electrochemical Reactor Analysis*, Elsevier, Amsterdam.
- Fahidy, T.Z. y Cœuret, F. (2003). Transfert de matière liquide-disque dans l'écoulement radial divergent entre disques – étude portant sur différentes échelles du système. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 81, 297-302.
- Horn, R.K. (1979). Similarity of Flow in Disc Stack Cells. *A.I.Ch.E. Symposium Series* n°185, 75, 125-127.
- Johnstone, R.E. y Thring M.W.(1957). *Pilot Plants, Models, and Scale-up Methods in Chemical Engineering*, Mc Graw Hill, Nueva York.
- Pickett, D.J. (1979). *Electrochemical Reactor Design*, 536, Elsevier, Amsterdam.
- Selman, R. y Tobias, C.W. (1978). Mass Transfer Measurements by the Limiting Current Technique. *Advances in Chemical Engineering*, 10, 86, Academic Press, New York.