

MODELO EFECTIVO DE DIFUSION CON CONTROL DE LA FASE SOLIDA

Edgar Chourio P. y César García
División de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad del Zulia
Maracaibo, Venezuela

SUMARIO

La transferencia de masa en sistemas de adsorción e intercambio iónico controlada por la fase sólida, bajo la condición de volumen de solución infinito y partículas esféricas es analizada considerando coeficiente de interdifusión dependiente de la concentración $\bar{D}_{AB} = f(X_A)$.

Del ajuste de los datos experimentales por el modelo numérico implementado en base a la combinación del método de colocación ortogonal y del método de Rosenbrock con la modificación de Davies, Swann y Campey, se encontraron las siguientes expresiones para el coeficiente de interdifusión variable con valores óptimos de alfa (α) y beta (β). Sistema orto Cloro Fenol-Carbón Activado a 110°C $\bar{D}_{AB} = (1+X_A)/(1+0.544 X_A)$. Sistema Fenol-Carbón Activado a 80°C $\bar{D}_{AB} = (1+X_A)/(1+0.544 X_A)$ y $\bar{D}_{AB} = 1.329 X_A^{1/0.963}$, Sistema (Na⁺-H⁺) - Zeo Karb 225 8% DVB a 25°C $\bar{D}_{AB} = (1+1.006 X_A)/(1+0.40 X_A)$.

La validez y utilidad del modelo efectivo de difusión es claramente establecida.

SUMMARY

The mass transfer in adsorption and ion exchange systems for particle control, under the condition of finite solution volume and spherical particles is analyzed considering the interdiffusion coefficient dependent of concentration, $\bar{D}_{AB} = f(x_A)$.

The fit of the experimental data by the numerical model implemented combining the orthogonal collocation method and the Rosenbrock method with the Davies, Swann and Campey modification shows the following relationships for the interdiffusion coefficient with optimum values of alfa (α) and beta (β). Thus, for the orto-chlorine phenol-activated coal system at 110 °C, $\bar{D}_{AB} = (1+X_A)/(1+0.544X_A)$; for the phenol-activated coal system a 80°C, $\bar{D}_{AB} = (1+X_A)/(1+0.544X_A)$ and $\bar{D}_{AB} = 1.329 X_A^{1/0.963}$; and for the Na⁺-H⁺-Zeo Karb 225 8% DVB system at 25 °C, $\bar{D}_{AB} = (1+1.006X_A)/(1+0.40X_A)$. The validity and utility of

the effective diffusion model is clearly established.

INTRODUCCION

El diseño y análisis de columnas de adsorción e intercambio iónico requieren del conocimiento detallado de datos de equilibrio, cinética y coeficientes de interdifusión para calcular los coeficientes de transferencia de masa tanto de la fase líquida como de la fase sólida. Actualmente se dispone de poca información sobre datos de coeficientes de interdifusión por lo que se hace necesario utilizar correlaciones para estimarlos; para ello se proponen las funciones siguientes :

$$\text{Tipo Langmuir } \bar{D}_{AB} = D_A \frac{1 + \beta_1 X_A}{1 + \alpha_1 X_A} \quad (1)$$

$$\text{Tipo Freundlich } \bar{D}_{AB} = D_A \alpha_2 X_A^{1/\beta_2} \quad (2)$$

$$\text{Tipo Temkin } \bar{D}_{AB} = D_A \alpha_3 L_n \beta_3 X_A \quad (3)$$

$$\text{Tipo Gilliland } \bar{D}_{AB} = D_A \alpha_4 e^{\beta_4 X_A} \quad (4)$$

Turner [1] y Ramírez [2] han hecho trabajos acerca de la verificación experimental y por computadora del modelo de Nernst-Planck para el coeficiente de interdifusión, en la cinética de un sistema de intercambio iónico binario.

El objetivo de este estudio fue desarrollar un modelo de difusión para procesos de adsorción e intercambio iónico gobernado por la ecuación diferencial parcial (5), capaz de optimizar los parámetros α y β a partir de datos experimentales de la cinética [3], [4], [5] usando la combinación del método de colocación ortogonal y del método de Rosenbrock modificado.

FORMULACION DEL MODELO

El objetivo de este modelo es simular la distribución de la concentración del soluto desde la interfase hacia el interior del sólido, mecanismo de transferencia de masa de los sistemas: Orto Cloro Fenol-Carbón activado a 110°C [3], fenol-carbón activado a 80°C [4] y (Na⁺-H⁺)-Zeol Carb 225 8% DVB a 25°C [1,5]. La transferencia de masa se analiza considerando: (i) concentración del soluto A uniforme en la partícula esférica al inicio de la difusión, (ii) La resistencia a la Transferencia alrededor de la partícula es despreciable, tal que la concentración a la superficie es constante y en equilibrio con la fase continua o líquida que mantiene su composición constante, (iii) en el centro de la partícula, la concentración del soluto alcanza un valor finito, (iv) efecto de la concentración sobre el coeficiente de interdifusión de superficie.

MODELO MATEMATICO

La ecuación de difusión en sólidos-adsorbente o resina- [6] de partículas esféricas, despreciando la difusión en las direcciones angulares y en términos de variables adimensionales es :

$$R^2 \frac{\partial X_A}{\partial t^*} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \bar{D}_{AB} \frac{\partial X_A}{\partial r} \right) \quad (5)$$

Sustituyendo las ecuaciones (1) a (4) en (5) se obtienen respectivamente :

$$\frac{\partial X_A}{\partial t^*} = \frac{1 + \beta_1 X_A}{1 + \alpha_1 X_A} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial X_A}{\partial r} \right) + \frac{\beta_1 - \alpha_1}{(1 + \alpha_1 X_A)^2} \left(\frac{\partial X_A}{\partial r} \right)^2 \quad (6)$$

$$\frac{\partial X_A}{\partial t^*} = \alpha_2 X_A^{1/\beta_2} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial X_A}{\partial r} \right) + \frac{1 - \beta_2}{\beta_2} \frac{X_A}{\beta_2} \left(\frac{\partial X_A}{\partial r} \right)^2 \quad (7)$$

$$\frac{\partial X_A}{\partial t^*} = \alpha_3 \ln \beta_3 X_A \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial X_A}{\partial r} \right) + \frac{\alpha_3}{X_A} \left(\frac{\partial X_A}{\partial r} \right)^2 \quad (8)$$

$$\frac{\partial X_A}{\partial t^*} = \alpha_4 e^{\beta_4 X_A} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial X_A}{\partial r} \right) + \alpha_4 \beta_4 e^{\beta_4 X_A} \left(\frac{\partial X_A}{\partial r} \right)^2 \quad (9)$$

METODO DE SOLUCION NUMERICA

Se quiere que la solución sea simétrica alrededor de $r=0$ en el dominio de $-1 < r < 1$, luego basta estudiar el intervalo $[0,1]$. Aplicando el método de colocación ortogonal [7], [8], a las ecuaciones diferenciales parciales no lineales (6) a (9), se transforma cada una en una sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales y se pueden escribir en términos de puntos de colocación característicos r_j :

$$\frac{dX_{Aj}}{dt^*} = \frac{1 + \beta_1 X_{Aj}}{1 + \alpha_1 X_{Aj}} \sum_{i=1}^{N+1} B_{ji} X_{Ai} + \frac{\beta_1 - \alpha_1}{(1 + \alpha_1 X_{Aj})^2} \sum_{i=1}^{N+1} (A_{ji} X_{Ai})^2 \quad (10)$$

$$\frac{dX_{Aj}}{dt^*} = \alpha_2 \ln(\beta_2 X_{Aj}) \sum_{i=1}^{N+1} B_{ji} X_{Ai} + \frac{\alpha_2}{X_{Aj}} \sum_{i=1}^{N+1} (A_{ji} X_{Ai})^2 \quad (11)$$

$$\frac{dX_{Aj}}{dt^*} = \alpha_3 X_{Aj}^{1/\beta_3} \sum_{i=1}^{N+1} B_{ji} X_{Ai} + \frac{1 - \beta_3}{\beta_3} \frac{\alpha_3 X_{Aj}}{\beta_3} \sum_{i=1}^{N+1} (A_{ji} X_{Ai})^2 \quad (12)$$

$$\frac{dX_{Aj}}{dt^*} = \alpha_4 e^{\beta_4 X_{Aj}} \sum_{i=1}^{N+1} B_{ji} X_{Ai} + \alpha_4 \beta_4 e^{\beta_4 X_{Aj}} \sum_{i=1}^{N+1} (A_{ji} X_{Ai})^2 \quad (13)$$

Las condiciones inicial y de contorno para cada sistema estudiado son :

Caso de Estudio N° 1 Sistema orto Cloro Fenol-Carbón Activado a 110°C

para $t^* = 0$ entonces $X_A(\bar{r}, 0) = 0.005$

para $\bar{r}_{N+1} = 1$ entonces $X_A(1, t^*) = 0.9880$ (Interfase)

Caso de Estudio N° 2 Sistema Fenol-Carbón Activado a 80°C

para $t^* = 0$ entonces $X_A(\bar{r}, 0) = 0.001$

para $\bar{r}_{N+1} = 1$ entonces $X_A(1, t^*) = 0.9800$ (Interfase)

Caso de Estudio N° 3 Sistema $(Na^+ - H^+) - Zeo$ Karb 225 8% DVB

para $t^* = 0$ entonces $X_A(\bar{r}, 0) = 1.000$

para $\bar{r}_{N+1} = 1$ entonces $X_A(1, t^*) = 0.4445$

Los parámetros difusionales α y β son estimados por el método de Rosenbrock con la modificación de Davies, Swann y Campey [9], usando el criterio de la minimización de una función objetivo definida como la suma de los cuadrados mínimos de la diferencia entre el valor experimental y el valor calculado.

$$FOBJ(X_A) = \sum (X_{AEX} - X_{APR})^2 \quad (14)$$

Para establecer comparaciones entre la data experimental y los resultados del modelo, es necesario considerar que a nivel de laboratorio resulta difícil evaluar perfiles de concentración como función de posición radial y tiempo $C = C(r, t)$ en el sólido. La interpretación del valor de concentración adimensional a cualquier instante sobre la fase sólida resultante de las ecuaciones (10) a (13) puede asumirse como la fracción de soluto promedio $\bar{X}_A(t^*)$ para una partícula de geometría esférica, expresada por :

$$\bar{X}_A(t^*) = \frac{\int_0^R X_A(r, t) r^2 dr}{\int_0^R r^2 dr} \quad (15)$$

Utilizando la fórmula de cuadratura de Gauss-Legendre, resulta :

$$\bar{X}_A(t^*) = \frac{\sum_{j=1}^{N+1} W_j X_{Aj}}{\sum_{j=1}^{N+1} W_j} \quad (16)$$

Esquema de la Solución Numérica

El procedimiento iterativo para resolver cada sistema de ecuación diferencial ordinaria (10) a (13) consiste en : 1. Definir las características de la aproximación : Geometría esférica $a = 3$, factor pesante $w(x) = 1.0$, polinomio de Legendre y números de puntos de colocación ortogonal $N = 6$. 2. Calcular las matrices Q , C y D , donde los componentes de cada matriz son :

$$Q_{ji} = \bar{r}_j^{2i-2}, \quad C_{ji} = (2i-2)\bar{r}_j^{2i-3} \quad \text{y}$$

$$D_{ji} = (2i-2)(2i-3)\bar{r}_j^{2i-4}$$

3. Calcular la matriz inversa de Q . 4. Calcular las matrices $A = C \cdot Q^{-1}$ y $W = f \cdot Q^{-1}$. 5. Calcular los parámetros α y β por el método de Rosenbrock con la modificación de Davies, Swann y Campey. 6. Calcular la fracción de soluto X_A para cada posición radial y tiempo mediante el uso del método de Euler. 7. Calcular la fracción promedio \bar{X}_{APR} . 8. El criterio de convergencia es cuando la función objetivo $FOBJ(X_A)$ sea mínima.

DISCUSION DE RESULTADOS

Se analiza la distribución de la fracción del adsorbato o ión con la posición radial y el tiempo para tres sistemas, considerando volumen de solución infinito y coeficiente de interdifusión \bar{D}_{AB} dependiente de la concentración. La fracción promedio a cualquier instante para una partícula de geometría esférica se define por la fórmula de cuadratura dada por la Ec.(16) y es generada por el modelo numérico en base a la combinación del método de colocación ortogonal y del método de Rosenbrock modificado para cuatro tipos de funciones de $\bar{D}_{AB} = f(X_A)$. Se utiliza aproximación simétrica polinomial con factor pesante $w(x)=1.0$ y $N=6$ puntos de colocación ortogonal porque resultados anteriores [2] y [8] demuestran que para la cinética de intercambio iónico bajo control de la fase sólida o control mixto de la fase líquida y sólida reproducen en su totalidad los datos experimentales.

En el Gráfico N° 1 se delinea la distribución de la fracción del Sistema orto Cloro Fenol-Carbón Activado versus tiempo adimensional o Número de Fourier de masa a 110°C, para condiciones iniciales y de contorno de $X_A(\bar{r}, 0)=0.005$ y $X_A(\bar{r}_{N+1}, t^*) = 0.9880$. Se observa que la función tipo Langmuir es

TABLA N° 1

VALORES OPTIMOS DE LOS PARAMETROS DIFUSIONALES α Y β PARA EL SISTEMA ORTO CLORO FENOL-CARBON ACTIVADO POR EL METODO DE ROSENBRACK MODIFICADO

Coeficiente Interdifusión $D_{AB} = FO_A$	Parámetros Difusionales				Función Objetivo	Tiempo Computación (min)
	Valores Iniciales		Valores Óptimos			
	α	β	α	β		
Langmuir	1.00	1.00	0.544	1.00	0.0038	6
Freundlich	1.329	0.899	1.329	0.886	0.15	6
Temkin	0.01	0.900	0.02	1.00	0.36	10
Gilliland	3.00	-1.00	2.942	-0.906	0.89	8

TABLA N° 2

VALORES OPTIMOS DE LOS PARAMETROS DIFUSIONALES α Y β PARA EL SISTEMA FENOL-CARBON ACTIVADO POR EL METODO DE ROSENBRACK MODIFICADO

Coeficiente Interdifusión $D_{AB} = FO_B$	Parámetros Difusionales				Función Objetivo	Tiempo Computación (min)
	Valores Iniciales		Valores Óptimos			
	α	β	α	β		
Langmuir	1.00	1.00	0.544	1.00	0.0026	18
Freundlich	1.329	0.950	1.329	0.963	0.0088	19
Gilliland	2.900	-0.900	3.150	-0.900	0.10	14

TABLA N° 3

VALORES OPTIMOS DE LOS PARAMETROS DIFUSIONALES α Y β PARA EL SISTEMA $(Na^+ - H^+)$ - Zeo Karb 225 #1 DVS POR EL METODO DE ROSENBRACK MODIFICADO

Coeficiente Interdifusión $D_{AB} = FO_A$	Parámetros Difusionales				Función Objetivo	Tiempo Computación (min)
	Valores Iniciales		Valores Óptimos			
	α	β	α	β		
Langmuir	1.00	1.00	0.400	1.008	0.0066	10
Freundlich	0.80	-2.50	0.812	-2.51	0.0012	22
Temkin	0.93	5.30	0.86	5.84	0.0063	60
Gilliland	1.80	-1.00	1.74	-0.98	0.0014	24

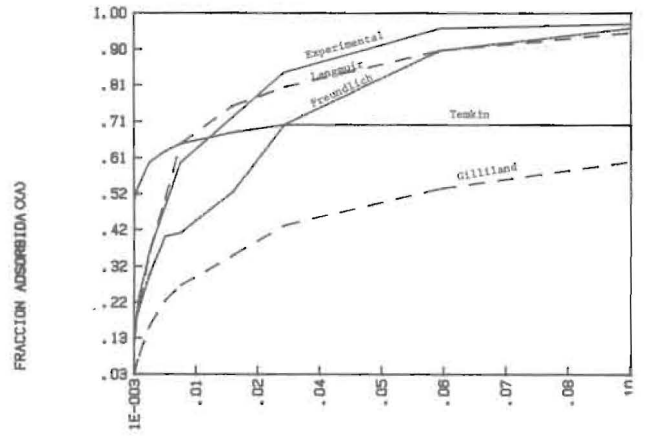


GRAFICO N°1: COMPARACION ENTRE LOS DATOS EXPERIMENTALES Y LOS RESULTADOS DEL MODELO DE LA CINETICA DEL SISTEMA O-CLOROFENOL-CARBON AC

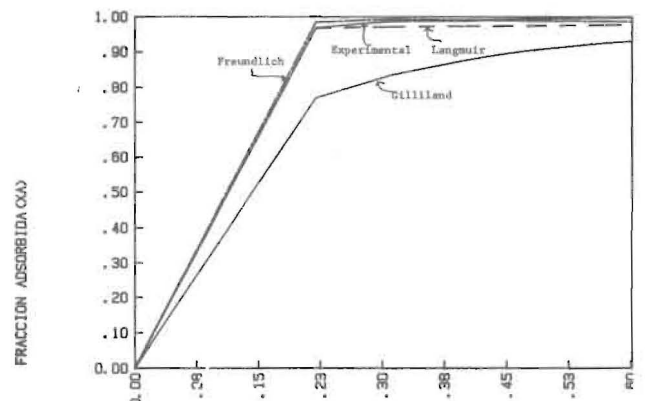


GRAFICO N°2: COMPARACION ENTRE LOS DATOS EXPERIMENTALES Y LOS RESULTADOS DEL MODELO DE LA CINETICA DEL SISTEMA FENOL-CARBON ACTIVADO.

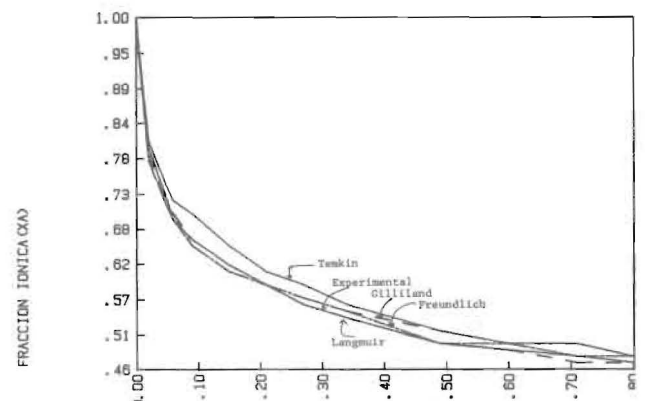


GRAFICO N°3: COMPARACION ENTRE LOS RESULTADOS NUMERICOS Y LOS DEL MODELO DE LA CINETICA DE UN SISTEMA DE INTERCAMBIO IONICO.

la que representa en casi su totalidad los datos experimentales [3]. Se alcanza una alta transferencia de masa al inicio del proceso en un rango de tiempo $0 < t^* < 0.024$.

La Tabla N° 1 muestra la evaluación de la capacidad del modelo en cuanto a la optimización de los parámetros difusionales α y β , obteniéndose valores mínimos de la función objetivo de 0.0098 (Langmuir), 0.16 (Freundlich), 0.56 (Temkin) y 0.89 (Gilliland). Cabe destacar que bajo el criterio de la suma de los cuadrados mínimos, la función tipo Langmuir proporciona el menor valor de la función objetivo con valores óptimos de $\alpha = 0.544$ y $\beta = 1.00$, para un tiempo de ejecución en el Minicomputador HP-1000 de seis minutos.

En el Gráfico N° 2 se delinea la distribución del Sistema Fenol-Carbón Activado versus tiempo adimensional o Número de Fourier de masa a 80°C para condiciones iniciales y de contorno de $X_A(\bar{r}, 0) = 0.001$ y $X_A(\bar{r}_{N+1}, t^*) = 0.9800$. Se observa que a medida que aumenta el Número de Fourier de masa aumenta la cantidad adsorbida de fenol con dirección de transferencia de masa ocurriendo desde la solución acuosa de fenol hacia la superficie del carbón activado. Destacándose que las funciones tipo Langmuir y Freundlich representan en casi su totalidad los datos experimentales [4] para un rango de fracción de fenol entre $0.97 < X_A < 1.00$.

En la Tabla N° 2 se muestra valores mínimos de la función objetivo de 0.00098 Freundlich y de 0.0026 Langmuir con tiempo de ejecución de 19 y 18 minutos respectivamente. Los valores óptimos encontrados para la función de tipo Freundlich es de $\alpha = 1.329$ y $\beta = 0.963$.

En el Gráfico N° 3 se delinea la distribución de la fracción del ión H^+ desde la resina hacia la solución acuosa versus tiempo adimensional o Número de Fourier a 25°C para condiciones iniciales y de contorno de $X_A(\bar{r}, 0) = 1.00$ y $X_A(\bar{r}_{N+1}, t^*) = 0.4445$. Se observa que la función tipo Langmuir es la que representa en su totalidad los resultados numéricos [5]. Las funciones tipo Freundlich y Gilliland representan en su totalidad los resultados numéricos para un rango de fracción entre $0.5650 < X_A < 1.00$, correspondiendo a un tiempo menor de 0.3.

La Tabla N° 3 muestra valores mínimos de la función objetivo 0.00046 Langmuir, 0.0012 Freundlich, 0.0014 Gilliland y 0.0063 Temkin; destacándose nuevamente que la función Langmuir es la que mejor predice los resultados numéricos con valores óptimos de $\alpha = 0.40$ y $\beta = 1.006$ para tiempo de ejecución de 10 minutos.

CONCLUSIONES

Del análisis comparativo entre los resultados del modelo y los datos experimentales de los sistemas binarios de Adsorción e Intercambio Iónico, pueden derivarse las siguientes conclusiones:

1. El modelo numérico implementado en base a la combinación del método de colocación ortogonal y del método de Rosenbrock modificado en lenguaje Fortran y utilizando el Minicomputador HP-1000 es confiable, para optimizar los parámetros y en este tipo de ecuaciones diferenciales parciales.

2. Bajo el criterio de la suma de los cuadrados mínimos, la función analítica tipo Langmuir $D_{AB} = D_A(1 + \beta X_A / 1 + \alpha X_A)$ proporciona el menor valor de la función objetivo, para $w(x) = 1.0$ y $N = 6$, capaz de predecir con gran precisión los resultados experimentales en procesos de Adsorción e Intercambio Iónico.

3. La distribución de la fracción de adsorbato o ión para los sistemas estudiados indican que se alcanza una alta transferencia de masa al inicio del proceso para tiempo adimensionales o Número de Fourier de masa menores de 0.30.

4. Del ajuste de los datos experimentales en combinación con el método de colocación ortogonal y del método de Rosenbrock modificado, se encontraron las siguientes expresiones para el coeficiente de interdifusión variable.

Sistema orto Cloro Fenol-Carbón Activado, a 110°C

$$D_{AB} = \frac{1 + X_A}{1 + 0.544X_A}$$

Sistema Fenol-Carbón Activado, a 80°C

$$D_{AB} = \frac{1 + X_A}{1 + 0.544X_A}$$

$$D_{AB} = 1.329X_A^{1/0.963}$$

Sistema $Na^+ - H^+ - Zeo Karb 225 8\% DVB$ a 25°C

$$D_{AB} = \frac{1 + 1.006X_A}{1 + 0.40X_A}$$

5. La ecuación del tipo Langmuir es la que proporciona una mejor aproximación a la data experimental.

LISTA DE SIMBOLOS

X_A : Fracción del adsorbato a remover o del ión a intercambiar = q/q_{ref}	α y β : Parámetros difusionales
q : Concentración del adsorbato o ión en la fase sólida (mg-ad/g) ó (meq-ión/g resina)	\bar{r}_j : Raíces del polinomio de Legendre
q_{ref} : Concentración máxima adsorbida o la capacidad total del intercambiador (mg-ad/g) ó (meq-ión/g resina)	X_{Aj} : Fracción en función de puntos de colocación \bar{r}_j y Número de Fourier t^*
\bar{r} : Posición radial adimensional dentro de la partícula = r/R	Q_{ji} : Componentes de la matriz \bar{Q}
R : Radio promedio de partícula (cm)	C_{ji} : Componentes de la matriz \bar{C} , representativa de la primera derivada
t^* : Tiempo adimensional o Número de Fourier de masa = $D_A t/R^2$	D_{ji} : Componentes de la matriz \bar{D} , representativa de la segunda derivada
D_A : Coeficiente de Difusión del soluto A (cm^2/seg)	A_{ji} : Componentes de la matriz \bar{A}
\bar{D}_{AB} : Coeficiente de interdifusión o difusividad efectiva (cm^2/seg)	B_{ji} : Componentes de la matriz \bar{B}
	f_i : Componentes del vector $\bar{f} = 1/2i-2+a$
	W_{ji} : Componentes de la matriz \bar{W}

REFERENCIAS

- [1] TURNER, J., CHURCH, M., JOHNSON, A. and SNOWDON, C. : "An experimental verification of the Nernst-Planck model for diffusion in an ion-exchange resin", Chem. Engng Scie., Vol. 21, 1966, pp. 317-325.
- [2] RAMIREZ, R., GARCIA, C. (Asesor) : "Análisis por Colocación Ortogonal de la Cinética de Intercambio Iónico Controlado por la Fase Sólida", Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Zulia, Maracaibo, Mayo 1981.
- [3] SUDO, Y., MISIC, D. and SUZUKI, M. : "Concentration dependence of effective surface diffusion coefficients in aqueous phase adsorption on activated carbon", Chem. Engng Scie., Vol. 33, 1978, pp. 1287 - 1290.
- [4] RAMOS, A., ROMERO, M. y GARCIA, C. (Asesor), : "Efectividad de Adsorbentes sobre Remoción de Solventes Orgánicos", Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Zulia, Maracaibo, 1982.
- [5] LUZARDO, F., BORJAS, M. y GARCIA, C. (Asesor), "Modelos Aproximados de Cinética de Intercambio Iónico Binarios", Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Zulia, Maracaibo, 1984.
- [6] BIRD, B. STEWART, W. y LIGHTFOOT, E. : "Fenómenos de Transporte", Primera Edición, Editorial Reverté, S.A., Capítulo 18, 1975.
- [7] FINLAYSON, B. : "The Method of Weighted Residuals and Variational Principles", Academic Press New York and London, Capítulo 5, 1972.
- [8] LARREAL, A., ARRIETA, I. y GARCIA, C. : "Sobre los Aspectos Integrales del Método de Colocación Ortogonal en la Cinética del Intercambio Iónico Bajo Control Mixto", Revista Técnica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Vol. 9, N° 1, 1986, pp. 9 - 15.
- [9] ARRIETA, I. : "Implementación y uso en un Micro-Computador del Método de Optimización de Rosenbrock con la Modificación de Davies, Swann y Campey", Trabajo de Ascenso, Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Zulia, Maracaibo, Diciembre 1986.

Recibido el 9 de junio de 1987