

SISTEMA Cu⁺⁺ - Na⁺ - DOWEX 50W-X8 EN LECHO FLUIDIZADO

César García y Gustavo Chavez
Escuela de Ingeniería Química,
Facultad de Ingeniería
Universidad del Zulia
Maracaibo - Venezuela

RESUMEN

El presente trabajo establece comparaciones desde el punto de vista de transferencia equivalente entre los patrones tradicionales de operación de intercambio iónico (batch y arreglo de lechos fijos) y lecho fluidizado. De igual manera, se establecen comparaciones para el factor electrostático basado en un modelo de película y determinado bajo condiciones experimentales. Los valores experimentales del coeficiente global de transferencia de masa (fase líquida) expresada en la forma del factor J_D de Chilton-Colburn no siguen líneas bases tipo Carberry (modelo de capa límite) y tipo Dwivedi (ajuste de datos experimentales). El factor electrostático alcanzó valores máximos en la región de transición (lecho fijo a lecho fluidizado) para un rango del Número de Reynolds modificado entre 6-9).

ABSTRACT

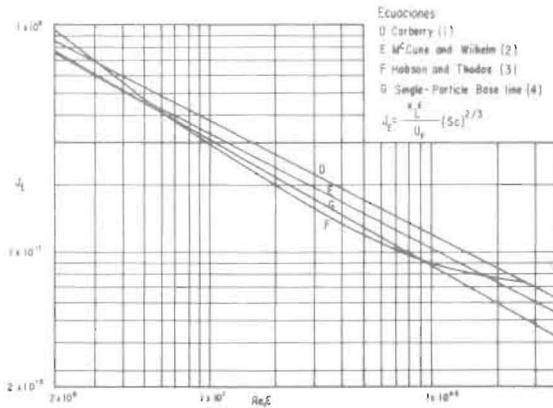
In the present research work, comparisons were established between the conventional patterns of mass transfer (batch and fixed beds) and fluidized beds for the Ionic System Cu⁺⁺ - Na⁺ -Dowex 50W-X8. Comparisons were also considered of the measured Electrostatic Mass Transfer Coefficient with those predicted by The Film Model under the same operating conditions. The experimental data on mass transfer expressed in the usual dimensionless group, Chilton-Colburn Factor, show some fundamental differences from the theoretical model of Carberry (boundary layer model) and the Dwivedi's correlation (based on experimental data for non - electrolytes). The maximum Electrostatic Mass Transfer Coefficient was observed in the range of the Modified Reynolds Numbers 6-9, corresponding to the transition state fixed bed to fluidized bed.

INTRODUCCION

Para lechos fijos y sistemas iónicos intercambiantes de igual movilidades, el coeficiente de tranferencia de masa K_f sin migración iónica, puede ser obtenido por una línea-base tipo factor J_D

Chilton Colburn, teórica como la Ecuación de Carberry para el Modelo de Capa límite (1) o por líneas - base experimentales como las de McCune -Wilhelm (2), Hobson - Thodos (3), Morrison (4), Dwivedi (5). La Figura No. 1 (6) muestra algunas líneas - base. La predicción de K_f para sistemas iónicos de diferentes movilidades usando factores J_D

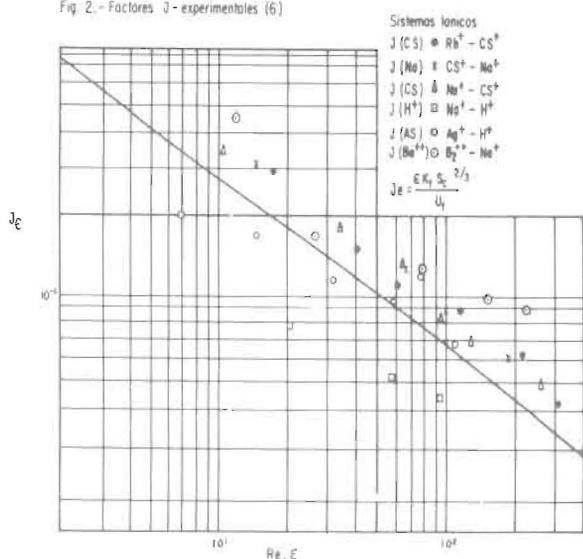
Fig 1 - Multiple líneas - base para fluido-particula



resulta poco exitoso. La Figura No. 2 (6) muestra tal situación donde el factor J_D contiene el coeficiente de auto-difusividad para el ión entrante. La explicación de esos resultados está basado en los efectos del campo eléctrico, completamente ignorado en la determinación de los coeficientes de transferencia de masa.

El intercambio de dos especies cargadas, iniciado por un gradiente de concentración, tiende a producir un campo eléctrico alterando los flujos iónicos. En la medida que el ión más rápido tiende a migrar a mayor velocidad, la acumulación de las cargas rápidamente genera un gradiente potencial eléctrico que reduce la velocidad del contra-ión rápido y acelera al contra-ión más lento. De esta manera, el desequilibrio de los flujos puramente difusionales de las dos especies cargadas es automáticamente corregido por una transferencia eléctrica super-impuesta al proceso de transporte, estableciéndose la equivalencia de los flujos iónicos requeridos para mantener la condición de electro neutralidad.

Fig 2.- Factores J -experimentales (6)



Van Broklyn (7) estudió teóricamente los efectos de migración iónica sobre el intercambio catiónico para el caso de transferencia de masa controlada por la fase líquida. El presentó los efectos de migración iónica sobre las tasas de transferencia de masa en términos de un factor R , el cual es la relación de la tasa de transferencia de masa con migración iónica a un conjunto dado de condiciones a la tasa de transferencia de masa sin migración iónica bajo el mismo conjunto de condiciones. Los resultados teóricos demuestran diferencias significantes para el sistema iónico $\text{Cu}^{++} - \text{H}^+$, la relación entre las tasas de transferencia de masa alcanza hasta un máximo de 13 veces basado en el modelo de película.

El objeto del presente trabajo (8) es un estudio experimental para el sistema iónico $\text{Cu}^{++} - \text{Na}^+$ en lecho fluidizado utilizando resinas de intercambio catiónico Dowex 50W-X8. De igual manera establecer comparaciones desde el punto de vista de transferencia equivalente para sistemas: batch, lecho fijo y lecho fluidizado. Finalmente, establecer comparaciones para el factor electrostático basado en un modelo de película y determinado bajo condiciones experimentales.

II. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

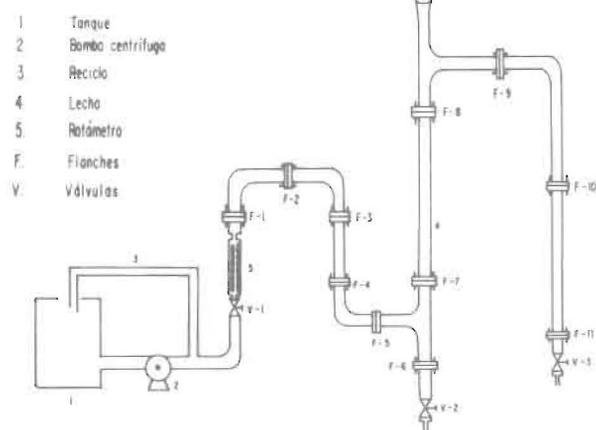
Para la realización de los experimentos se seleccionaron tres tamaños diferentes de partículas de resina -16 + 20, - 20 + 25 y - 25 + 30, por procedimientos standards (9, 10). Cada rango de resina es caracterizado por las propiedades densidad real, porosidad y capacidad en forma de iones de Na^+ y Cu^{++} .

Para la activación de la resina de intercambio catiónico se prepararon soluciones de NaCl de concentraciones 0.01, 0.05, 0.10, 0.50 y 1.00 N. Para el intercambio iónico se prepararon soluciones de

Sulfato Cúprico Penta-Hidratado de concentraciones 0.01, 0.04, 0.05, 0.08 y 0.10 N.

El proceso de activación de la resina y el intercambio de Cu^{++} por iones de Na^+ se realizó en el equipo mostrado en la Figura No. 3. Para el pro-

Fig N° 3 EQUIPO EXPERIMENTAL



ceso de intercambio iónico $\text{Cu}^{++} - \text{Na}^+$ se siguió el siguiente procedimiento.

- Se colocó la resina una vez activada en forma de Na^+ en la columna hasta alcanzar determinada altura formando así un lecho fijo. Se hicieron ensayos con diferentes tamaños.
- Se coloca la solución de sulfato cúprico - penta-hidratado de concentración conocida en el tanque de vidrio al cual se le ha medido previamente su conductividad eléctrica y se agita mediante un reciclo colocado después de la salida de la bomba al tanque para mantener su concentración constante.
- Antes de comenzar el proceso se llenan todas las tuberías del equipo colocadas antes del lecho con la solución, de manera que no quedan burbujas de aire en su interior; esto se hace con la finalidad de evitar fluctuaciones en los caudales y asegurar distribución uniforme dentro de la geometría de fluidización para el sistema líquido-sólido.
- Se procede a hacer pasar solución a través del lecho con ayuda de la bomba, los caudales son controlados mediante la manipulación de la válvula y con la ayuda del rotámetro.
- Para cada lectura diferente del rotámetro se leyó la altura correspondiente al lecho y simultáneamente se recogieron 250 ml. de la solución saliente cada minuto a la cual se le medía su conductividad eléctrica. Esta recolección de soluciones salientes se hacía para las diferentes posiciones del rotámetro hasta alcanzar el punto

máximo de fluidización. Cuando la conductividad eléctrica de la solución saliente se hacía igual a la conductividad eléctrica de la solución original colocada en el tanque de suministro, el proceso de intercambio iónico se consideraba en completo estado de saturación.

f) A las soluciones salientes se les determinó posteriormente el contenido de iones Na^+ y Cu^{++} en solución para así determinar luego la cantidad de ambos iones intercambiados durante el proceso. Para ello se disponía de previa calibración de mezclas sodio-cobre usando conductividad y tramitancia.

Para cuantificar las concentraciones instantáneas se requiere el trazado de curvas de calibración en base a propiedades representativas para el sistema iónico de comportamiento lineal en el rango de concentraciones usadas. La conductividad eléctrica resultó la mejor representación del contenido salino tanto por soluciones de NaCl , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2SO_4 como para mezclas volumétricas. Los valores del intercambio $\text{Cu}^{++} - \text{Na}^+$ para el balance de materiales en las fases líquida y sólida requiere de mayor exactitud y a tal efecto se trazaron curvas de calibración: contenido metálico - por porcentaje de tramitancia en el espectrofotómetro de absorción atómica marca Varian T modelo AA-6.

Para los ensayos de intercambio entre la resina en forma de Na^+ y la solución acuosa conteniendo los iones de Cu^{++} , en el régimen de fluidización y al tiempo de contacto t_f , la cantidad de iones Cu^{++} sobre la resina es:

$$q = \frac{Q}{m} \int_0^{t_f} (C_{z=0} - C_{z=1}) dt \quad (1)$$

donde Q es el caudal de la solución fluidizante, m masa de la resina, $C_{z=0}$ la concentración de iones Cobre en la solución original, $C_{z=1}$ la concentración de iones Cu^{++} en el efluyente al tiempo t_f .

Para la evaluación del coeficiente global de transferencia de masa de la fase líquida se utiliza la aproximación

$$k_{\text{exp}} = \frac{Q}{A l \epsilon} \ln \frac{C_{z=0} - C^*}{C_{z=1} - C^*} \quad (2)$$

donde A es la sección transversal de la tubería de fluidización, l es la altura del lecho expandido, ϵ la porosidad del lecho fluidizado, $C^* = F(q)$ la concentración de equilibrio de iones Cu^{++} en solución.

Para la evaluación teórica del coeficiente global de transferencia de masa para la fase líquida en función de las condiciones de operación para el sistema $\text{Cu}^{++} - \text{Na}^+$ se emplearon las siguientes correlaciones:

$$\text{Carberry} \frac{k_m S_c^{2/3}}{u_f} = 1.15 \text{Re}^{-1/2} \quad (3)$$

$$\text{Dwivadi} \frac{k'_T S_c^{2/3}}{u_f} = \frac{1.043}{\text{Re}^{0.82}} + \frac{0.95}{\text{Re}^{0.46}} \quad (4)$$

donde el Número de Reynolds contiene la velocidad intersticial y el Número de Schmidt contiene la difusividad del ión entrante Cu^{++} .

El factor electrostático R_i es definido como la relación entre el coeficiente global de transferencia de masa (calculado por la Ec. 2) para el intercambio $\text{Cu}^{++} - \text{Na}^+$ y el coeficiente global de transferencia de masa basado en el ión entrante Cu^{++} bajo las mismas condiciones de fluidización (calculado por las ecuaciones 3-4). Así:

$$R_{\text{exp}} = \frac{k_{\text{exp}}}{k'_T} \quad (5)$$

$$R'_{\text{exp}} = \frac{k'_{\text{exp}}}{k'_T} \quad (6)$$

Los valores R_{exp} y R'_{exp} fueron comparados con el factor electrostático R_T resultante del modelo de película (Ref. 6 y 7) como función del Número de Reynolds modificado. El modelo teórico de Película servirá solo de referencia a los resultados experimentales obtenidos. Obviamente de acuerdo a las aproximaciones y derivaciones conceptuales es más recomendable para sistemas de carga y lechos fijos con soluciones a bajos caudales ya que no considera los efectos hidrodinámicos del sistema.

DISCUSION DE RESULTADOS

Para cualquier estudio experimental sobre transferencia de masa resulta conveniente estudiar la dinámica del sistema, distribución de velocidades, condiciones de inundación, etc. Para el sistema iónico, se examinaron las condiciones de fluidización usando agua destilada como agente fluidizante del material sólido (resina inerte previamente tamizada). La Figura No. 4 presenta la porosidad del lecho como función de la relación de velocidades (velocidad del agente fluidizante/velocidad terminal calculada) para la resina de tamaño -16 +20.

La dependencia entre la velocidad del agente fluidizante y la velocidad terminal puede aproximarse por la expresión tipo Richardson-Zaki,

$$\frac{V}{V_t} = 0.18885 \epsilon^{4.333}$$

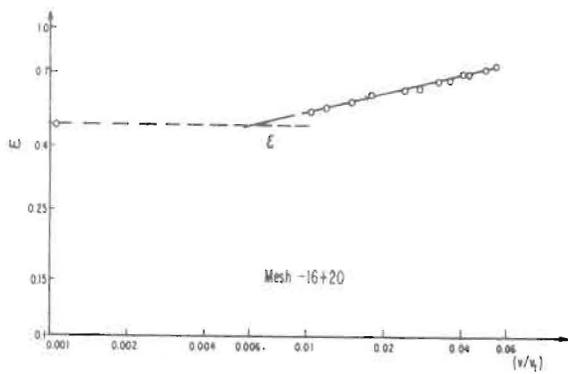
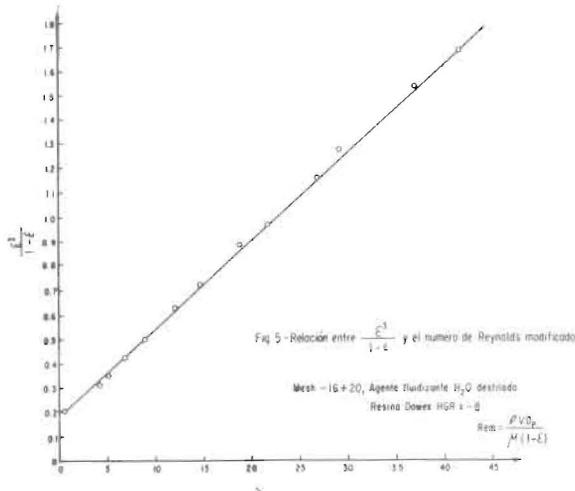


Fig. 4.-Porosidad y relación de velocidad

El lecho fijo mantiene la porosidad de 0.468 hasta valores de V/V_t menores de 0.007035, mientras la condición extrema de transporte de partículas resulta para $V/V_t \geq 0.18885$. La relación entre porosidad y velocidad superficial está dada por la expresión matemática $V = 3.5658 \epsilon^{4.333}$; la velocidad superficial es de interés para dimensionar unidades de fluidización ya que representa el caudal (Q) por unidad de área transversal (S), cm^3/cm^2 - seg, así el rango de Q/S varía desde 0.133 (fluidización incipiente) hasta 3.5658 (transporte de partículas) para la resina Dowex HGR 50W-8. La caída de presión para un lecho fluidizado incrementa desde el levantamiento del lecho hasta la fluidización misma donde la variación no es muy apreciable, aproximando con la ecuación de Ergun:

$$g_c \frac{\Delta P}{z} \frac{d_p}{\rho_f V^2 (1-\epsilon)} = 150 \frac{1-\epsilon}{R_{em}} + 1.75$$

La figura No.5 muestra la variación entre $\epsilon^3 / (1-\epsilon)$



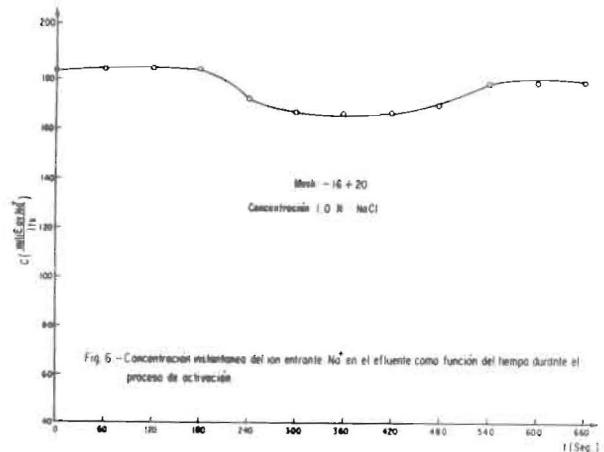
y el número de Reynolds modificado, $R_{em} = R_e / (1-\epsilon)$. La dependencia es lineal asegurando la aplicación de la ecuación de Ergun para $E < 45$. Sustituyendo la expresión anterior de velocidad superficial, resulta la siguiente ecuación para estimar $\Delta P/z$ para el agente fluidizante:

$$g_c \frac{\Delta P}{z} \frac{d_p}{\rho_f} \frac{1}{\epsilon^{5.67} (1-\epsilon)} = \frac{1907.24}{R_{em}} + 22.25;$$

$$R_{em} < 45$$

i) ACTIVACION DE LA RESINA

El proceso de activación con soluciones de NaCl es mostrado en la Figura No. 6 para el tamaño

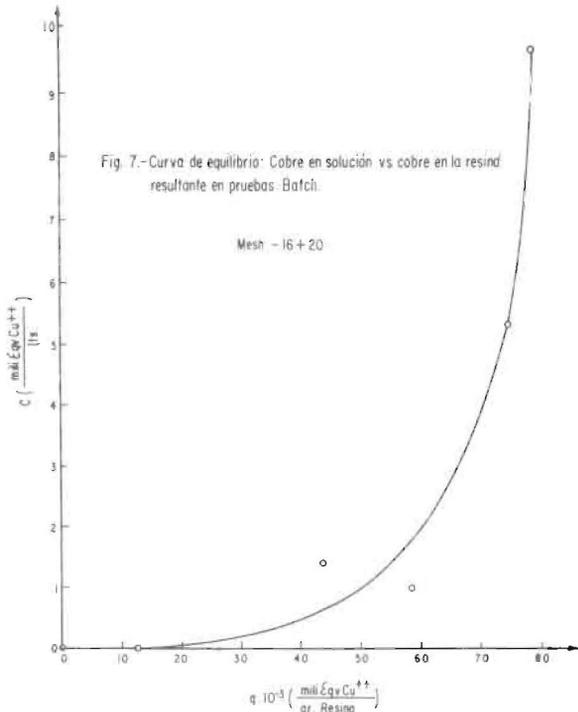


de partícula -16 + 20. Operando bajo condiciones de fluidización (anteriormente estudiadas), la concentración instantánea del ion Na^+ en el efluente alcanza el valor máximo una vez iniciado el proceso de activación, luego fluctúa de manera sinusoidal análogo al comportamiento de la caída de presión en el estado fluidizado, hasta alcanzar las condiciones de saturación en un tiempo de 600 segundos aproximadamente en comparación a 6 horas requeridas para ensayos batch. La capacidad de intercambio aumenta con disminución del tamaño de partícula. Esto es una generalización para materiales adsorbentes. Comparando los resultados para una concentración externa de 0.0 5N NaCl, las partículas de tamaño -20 + 25 reducen la concentración iónica del Na^+ desde 19.65 meq./lt. a 18.15 meq./lt para un tiempo de contacto de 540 segundos, mientras para las partículas de tamaño -16 +20, la variación es desde 19.65 meq. Na^+ /lt a 18.66 meq. Na^+ /lt para el mismo tiempo de contacto. Posiblemente, el incremento de tamaño se traduce en resistencia al proceso difusional en la partícula de intercambio iónico.

ii) INTERCAMBIO $\text{Cu}^{++} - \text{Na}^+$, ENSAYO TIPO BATCH

La resina previamente activada con soluciones de NaCl, en contacto con soluciones acuosas del compuesto $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (0.01N, 0.04N, 0.05N, 0.08N y 0.10N) para un tiempo de residencia de 6 horas y bajo constante agitación, representa la condición

máxima de transferencia para determinado sistema iónico. Tal situación significa el equilibrio de distribución del ión Cu^{++} en la fase acuosa y en la fase sólida (resina). La Figura 7 muestra la isoterma meq. Cu^{++} /litro vs. meq. Cu^{++} /gramo para el tamaño de resina. -16 + 20.



Del análisis de tales resultados pueden derivarse las siguientes conclusiones:

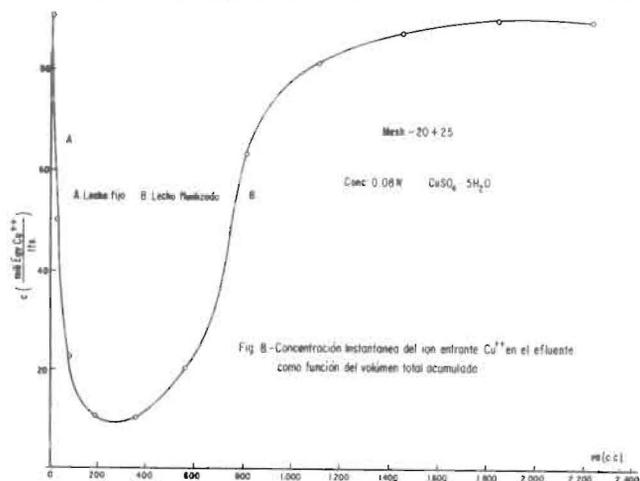
1) El punto de equilibrio resulta independiente del tamaño de la partícula para el rango de concentraciones usadas. 2) La capacidad de la resina tiende hacia el valor límite de 0.7889 meq. Cu^{++} /g. de resina. Esto significa que cada gramo de resina seca en forma de Na^+ puede intercambiar la cantidad máxima de 0.7889 meq. Cu^{++} hasta saturarse. 3) La resina ofrece mayor efectividad cuanto más diluida sea la sal cúprica. En Ingeniería Ambiental el tratamiento de poluentes diluidos por otros procesos resulta más costoso que poluentes concentrados. Por ejemplo la solución de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ es reducida desde 10 meq./lt. a 0.004 meq./lt para una eficiencia de 99.96% mientras la solución de 100 meq./lt es reducida a 38 meq./lt para una eficiencia de 62%. Esto no significa que la resina resulta ineficiente para remover poluentes concentrados sino que habría que disponer de unidades batch en series, así la solución de 100 meq./lt como por ejemplo $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ es reducida a 38 meq./lt (unidad batch primaria), la segunda unidad reduce desde 40 meq./lt a 0.360 meq./lt y así sucesivamente según sean los requerimientos de descarga del efluente.

iii) INTERCAMBIO $\text{Cu}^{++} - \text{Na}^+$, LECHO FLUIDIZADO

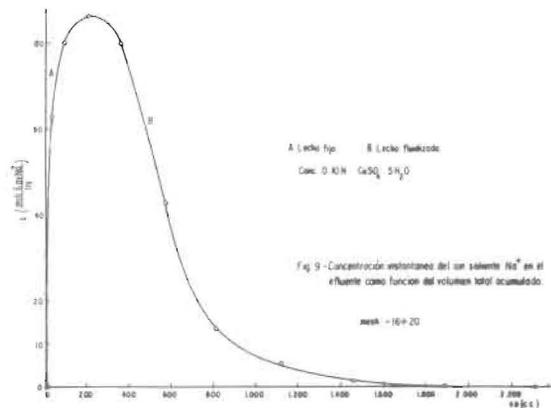
El proceso de transferencia puede representar-

se por un mecanismo difusional controlado por dos resistencias, fase acuosa o fase sólida. El ión Cu^{++} difunde a través del seno de la solución acuosa hasta alcanzar la superficie del intercambiador catiónico, donde ocurre la transferencia equivalente $\text{Cu}^{++} \rightleftharpoons \text{Na}^+$ seguidamente la difusión en la partícula.

La Figura No.8 muestra la historia de saturación



de la resina como función del volumen total acumulado para el tamaño -20 + 25 y grado de concentración de solución $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 0.08 N. La solución cúprica actúa como agente fluidizante. De tal manera la transferencia ocurre inicialmente como lecho fijo. Donde se observa control de la fase sólida, el ión Na^+ difunde a mayor velocidad que el ión Cu^{++} . Debe esperarse la mayor concentración del ión Na^+ durante el estado de lecho fijo, el intercambio $\text{Cu}^{++} - \text{Na}^+$ tiende a normalizarse en el estado de lecho fluidizado, hasta alcanzar las condiciones de saturación. Observando la Figura No. 9, puede notarse que la concentración iónica del Na^+ incrementa inicialmente hasta alcanzar un valor



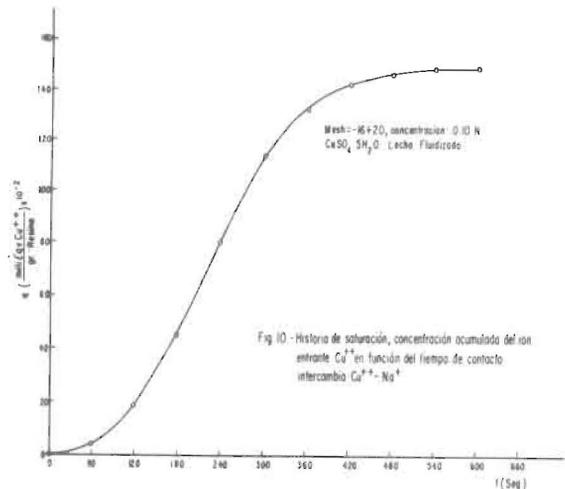
máximo en el efluente, luego disminuye en la medida que la resina es saturada con iones Cu^{++} . Equivalentemente la concentración del ión Cu^{++} alcanza un valor mínimo, aumentando hasta alcanzar la concentración externa de solución. Tal tratamiento de

transferencia conduce a afirmar que el intercambio del sistema iónico $\text{Cu}^{++} - \text{Na}^+$ es controlado por la fase sólida durante el estado de lecho fijo y por la fase líquida durante el estado de lecho fluidizado. La mayor tasa de transferencia ocurre en la región de lecho fijo y una vez iniciado el lecho fluidizado. El lecho fijo tiende a saturarse en un menor tiempo referido al lecho fluidizado, sin embargo no hay garantía de una distribución uniforme de saturación para la resina. El lecho fluidizado ofrece por la mayor porosidad y contacto solución-partícula en constante movimiento, mejor distribución de saturación. Desde el punto de vista práctico, bastará reducir el tiempo del estado de lecho fijo controlando la velocidad mínima de fluidización según la relación velocidad-porosidad.

Comparando los resultados para el tamaño de resina - 20 + 25, se derivan las siguientes observaciones a priori : i) Incremento del grado de concentración de la solución externa, disminuye el tiempo de saturación; ii) Incremento del grado de concentración de la solución externa, aumenta la resistencia de la fase sólida sobre el intercambio iónico en el estado de lecho fijo. Para 240 segundos de tiempo de contacto, la concentración del ión Cu^{++} disminuye desde 17.20 meq./lt a 1.11 meq./lt para una eficiencia de transferencia de 93.5 %, mientras la concentración del ión Cu^{++} de 90.40 meq./lt disminuye a 10.36 meq./lt (región de lecho fijo) para una eficiencia de 88.5%. Desde el punto de vista de diseño, el volumen total acumulado representa la cantidad total de volumen de solución acuosa que puede ser tratada hasta alcanzar en el efluente cierto nivel de contenido cúprico, por ejemplo si se deseara saber qué volumen de solución $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ de concentración original 90.40 meq./lt como Cu^{++} se requiere tratar a través de una columna de resina de tamaño -20 + 25 hasta que la concentración para el efluente no exceda a 20.32 meq./lt (por ser el valor máximo permisible según controles de polución). Bastará usar la Figura No.8, resulta 558 cm^3 como volumen total acumulado para un tiempo de contacto de 300 segundos, o para un caudal promedio de $1.86 \text{ cm}^3/\text{seg}$. en un tiempo de 5 min. para las dimensiones de la unidad de fluidización a nivel de laboratorio.

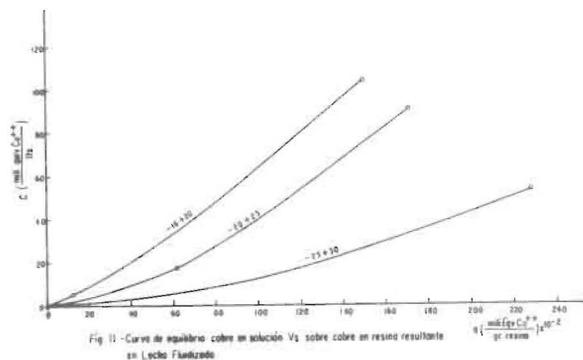
iv) EQUILIBRIO $\text{Cu}^{++} - \text{Na}^+$, LECHO FLUIDIZADO

La integración trapezoidal del balance de materiales permite determinar la cantidad del ión Cu^{++} en la fase sólida (resina en forma del ión Cu^{++}) como función del tiempo de contacto, valores instantáneo y acumulado. La Figura No. 10 contiene la saturación de la resina en forma de Cu^{++} , notándose que para el lecho fijo sigue un comportamiento lineal. En la medida que el grado de concentración de la solución externa aumenta, el tiempo resulta interesante observar, por ejemplo la Figura No. 10, la concentración de saturación para el tamaño - 16 + 20 es 1.50 meq. Cu^{++}/g . resina durante 600 segundos de contacto cuando la concentración de la solución acuosa es de 104.10 meq. $\text{Cu}^{++}/$



lt, mientras la concentración acumulada es 1.13 meq. Cu^{++}/g . resina alcanzada durante los primeros 300 segundos de contacto líquido-sólido. Esto significa el 75% de la capacidad de la resina. Comparando los resultados para el tamaño de partícula -20 + 25 y concentraciones del agente fluidizante 17.20 meq. Cu^{++}/lt y 90.40 meq. Cu^{++}/lt respectivamente, sobre una base de tiempo de contacto de 660 segundos, las concentraciones acumuladas del ión Cu^{++} en la resina resultan 0.615 meq. Cu^{++}/g . de resina y 1.710 meq. Cu^{++}/g . resina correspondiente. Tal resultado permite concluir que la capacidad de saturación de la resina aumenta con el incremento del grado de concentración del ión Cu^{++} en la solución fluidizante, para determinado tamaño de partícula - 25 + 30, para 53.34 meq. Cu^{++}/lt en la solución fluidizante, la concentración acumulada del ión Cu^{++} en la resina resultó 2.285 meq. Cu^{++}/g . resina en comparación con 1.710 meq. Cu^{++}/g . resina usando 90.40 meq. Cu^{++}/lt en la solución fluidizante.

Obviamente, el tamaño de la partícula ejerce mayor control sobre la capacidad de saturación que el grado de concentración de la solución fluidizante. La Figura No. 11 muestra el equilibrio para un lecho fluidizado, a diferencia del ensayo batch. El punto final de equilibrio depende del tamaño de partícula. Bastará comparar por ejemplo, para una concentración de 50 meq. Cu^{++}/lt en la solución fluidizante, las capacidades de saturación resultan 0.85 meq. Cu^{++}/g . resina, 1.22 meq. Cu^{++}/g . resina y 2.20 meq. Cu^{++}/g . resina para los tamaños de par-



tículas - 16 + 20, - 20 + 25 y - 25 + 30 respectivamente.

v) COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE MASA BASADO EN LA FASE LIQUIDA (K_{fa}).

El conocimiento de K_{fa} resulta de interés práctico para dimensionar unidades de intercambio iónico (lecho fijo o fluidizado). La Figura No. 12 presenta la variación de K_{fa} como función del intercambio $Cu^{++} - Na^{+}$ a través de las fases de fluidización. Como característica representativa, cada zona presenta comportamiento lineal en función de la concentración acumulada del ión Cu^{++} en la resina, la región de lecho fijo presenta inclinación positiva mientras la región de lecho fluidizado presenta pendiente negativa, la región de transición (fijo o lecho fluidizado) contiene los valores máximos de K_{fa} . Para el tamaño - 20 + 25 y concentración fluidizante 0.04 N $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ la variación de K_{fa} aumentó desde 0.0158 seg^{-1} hasta 0.1329 seg^{-1} (región lecho fijo) y en la zona de lecho fluidizado disminuyó desde 0.1329 seg^{-1} hasta 0.0152 seg^{-1} ; mientras para la concentración fluidizante de 0.08N $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, aumentó desde 0.0169 hasta 0.1159 seg^{-1} en la zona de lecho fijo y desde 0.1159 a 0.0224 seg^{-1} . Aparentemente, la concentración externa de la solución no tiene mayor efecto sobre los coeficientes de transferencia de masa. Para el tamaño - 16 + 20, con una concentración fluidizante de 0.10N $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, la variación de K_{fa} resulta así desde 0.0264 seg^{-1} a 0.1056 y desde 0.1056 a 0.0324 seg^{-1} para las zonas de lecho fijo y fluidizado respectivamente.

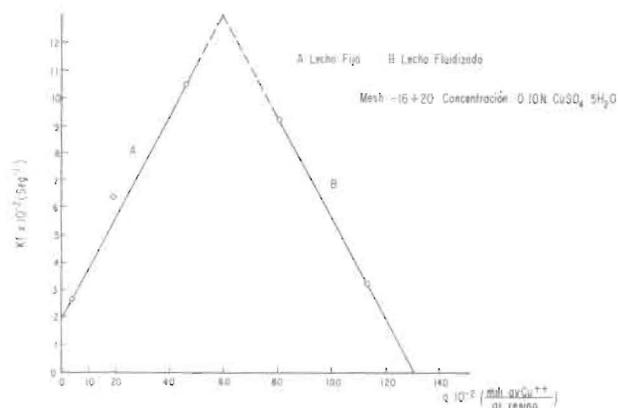


Fig. 12 - Variación del coeficiente global de transferencia de masa para la fase líquida como función de la cantidad acumulada del ión Entrante Cu^{++} en la resina

Aparentemente, la disminución del tamaño de partículas causa disminución en los coeficientes de transferencia de masa. La disminución del coeficiente global de transferencia de masa implica disminución en la resistencia de la fase líquida sobre el proceso neto de intercambio iónico. Esto permite concluir que el estado fluidizado disminuye la resistencia de la fase líquida sobre el intercambio $Cu^{++} - Na^{+}$.

vi) COMPARACION CON LINEAS BASES DEL FACTOR J_D DE CHILTON-COLBURN

En la literatura existe un gran número de correlaciones de bases experimentales o teóricas para predecir coeficientes de transferencia de masa, tales como la ecuación de Carberry basada sobre un modelo de capa límite y la ecuación de Dwivedi basada en resultados experimentales. En intercambio iónico, el gradiente de concentración genera un gradiente electrostático que altera los flujos puramente difusionales expresados por la Ley de Fick (base de muchas correlaciones teóricas). Por otro lado, las correlaciones experimentales determinadas en base a cierto sistema de transferencia y geometría no resultan apropiadas a otros sistemas de transferencia por lo general.

La Figura No. 13, muestra que el sistema iónico $Cu^{++} - Na^{+}$ no puede ser representado por correlaciones bases (Modelo de Carberry y Correlación Dwivedi) que excluyan el efecto electrostático autoinducido durante la transferencia.

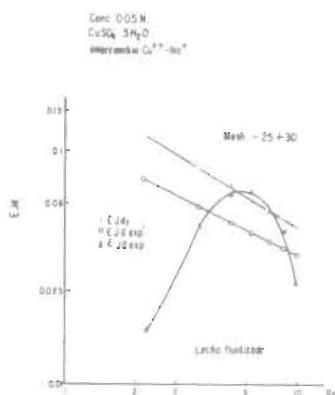


Fig. 13 - Comparación del factor J_d de Chilton - Colburn vs Re entre las líneas bases de Carberry y Dwivedi y los resultados experimentales presentes

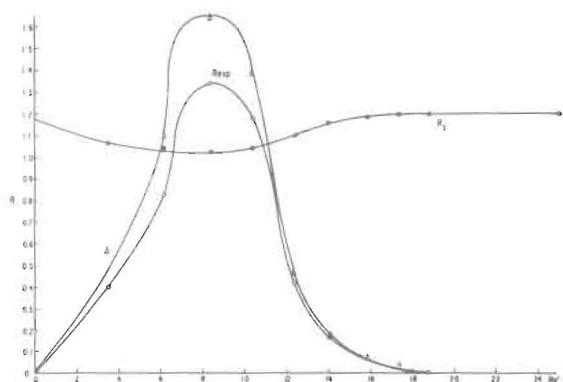
vii) COMPARACION DEL FACTOR ELECTROSTATICO R

Los resultados anteriores permiten definir el factor electrostático como el cociente entre el coeficiente global de transferencia de masa para el intercambio iónico $Cu^{++} - Na^{+}$ y el coeficiente global de transferencia de masa basado en el ión entrante Cu^{++} de acuerdo a las correlaciones de Carberry y Dwivedi; además comparado con el factor electrostático resultante del modelo de película, como función del número de Reynolds modificado (Re'). El modelo teórico de película se desvía por completo de los resultados experimentales presentados.

Los valores de R calculados según la línea base de Dwivedi resultan mayores a los R calculados según la línea base de Carberry, sin embargo la diferencia disminuye en la medida que aumenta el tamaño de la partícula. Los valores de R (7) según el modelo de película, calculados para el gradiente de

concentración instantánea resultaron entre 1.0 y 1.25. Según los resultados experimentales, el factor electrostático alcanza el valor máximo durante la transición del lecho fijo a lecho fluidizado. Para el rango del número de Reynolds modificado entre 6-9 se logra el mayor efecto del campo electrostático autoinducido.

La Figura No. 14 permite introducir un factor de corrección para diseño de unidades de intercambio iónico, por ejemplo si el tamaño de partículas es $-20 + 25$ y la concentración fluidizante $0.04N \text{ CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ para el Reynolds modificado de 11, el coeficiente de transferencia de masa calculado según la ecuación de Carberry debe ser multiplicado por 1.30 mientras si es calculado por la ecuación de Dwivedi deberá ser multiplicado K_{fa} por 1.40.



CONCLUSIONES

En base a la discusión de los resultados expuestos anteriormente se concluye lo siguiente:

- 1) Para las isotermas meq. Cu^{++} /litro vs. meq. Cu^{++} /gramo obtenidas para los tamaños de resina $-16 + 20$, $-20 + 25$ y $-25 + 30$ durante el intercambio $\text{Cu}^{++} - \text{Na}^{+}$ en los ensayos tipo batch se concluye:
 - i) El punto de equilibrio resulta independiente del tamaño de la partícula para el rango de concentraciones usados;
 - ii) La capacidad de la resina tiende hacia el valor límite de 0.7889 meq. Cu^{++} / gr-resina, esto significa que cada gramo de resina seca, en forma de Na puede intercambiar la cantidad máxima de 0.7889 meq. Cu^{++} hasta saturarse;
 - iii) La resina ofrece mayor efectividad cuanto más diluida sea la solución cúprica.
- 2) Observando los resultados correspondientes al intercambio $\text{Cu}^{++} - \text{Na}^{+}$ en lecho fluidizado, puede notarse que la concentración iónica del Na^{+} incrementa inicialmente hasta alcanzar un valor máximo en el efluente, luego disminuye en la medida que la resina es saturada con iones Cu^{++} , equivalentemente la concentración del ión Cu^{++} alcanza un valor mínimo, aumentando hasta alcanzar la concen-

tración externa de la solución. Tal comportamiento de transferencia conduce a afirmar que el intercambio del sistema iónico $\text{Cu}^{++} - \text{Na}^{+}$ es controlado por la fase sólida durante el estado de lecho fijo y por la fase líquida durante el estado de lecho fluidizado.

- 3) En base al coeficiente global de transferencia de masa basado en la fase líquida (K_{fa}) se concluyó lo siguiente:
 - i) Cada zona presenta comportamiento lineal en función de las concentraciones acumuladas del ión Cu^{++} en la resina y la región de lecho fijo presenta inclinación positiva mientras; la región de lecho fluidizado presenta pendiente negativa, la región de transición (fijo a lecho fluidizado) contiene los valores máximos de K_{fa} .
 - ii) Aparentemente, la disminución del tamaño de partícula causa disminución en los coeficientes de transferencia de masa. Disminución del coeficiente global de transferencia de masa implica disminución en la resistencia de la fase líquida sobre el proceso neto de intercambio iónico. Esto permite concluir que el estado fluidizado disminuye la resistencia de la fase líquida sobre el intercambio $\text{Cu}^{++} - \text{Na}^{+}$.
- 4) En relación al factor J_D de Chilton-Colburn se concluye que el sistema $\text{Cu}^{++} - \text{Na}^{+}$ no puede ser representado por correlaciones bases (Modelo de Carberry y correlación de Dwivedi) que excluyen el efecto electrostático autoinducido durante la transferencia.

- 5) En base a las comparaciones del factor electrostático (R) se concluyó que:
 - i) Los valores de R calculados según la línea base Dwivedi resultan mayores a los R calculados según la línea base de Carberry, sin embargo, la diferencia disminuye en la medida que aumenta el tamaño de la partícula;
 - ii) Los valores de R según el modelo de película calculados para el gradiente de concentración instantáneo resultaron entre 1.0 y 1.25;
 - iii) Según los resultados experimentales, el factor electrostático alcanza el valor máximo durante la transición del lecho fijo a lecho fluidizado;
 - iv) Para el rango del número de Reynolds modificado entre 6-9 se logra el mayor efecto del campo electrostático autoinducido;
 - v) Las Figuras Nos. 49-53 permiten introducir un factor de corrección para diseño de unidades de intercambio iónico.

LITERATURA CITADA

- 1) CARBERRY J., AICHE Journal, 460 (1960).
- 2) Mc CUNE L. and WILHELM R., Ind. Eng. Chem., 41, 1124 (1949).
- 3) HOBSON M. and THODOS G., Chem. Eng. Prog., 45, 517 (1949).
- 4) MORRISON J., M. Sc. Thesis, University of Washington (1967).
- 5) DWIVEDI P. and UPADHYAY S., Ind. Eng. Chem. Pro-

cess Design and Development, 16, 157 (1977).

- 6) GARCIA C., M.Sc. Thesis, University of Washington (1975).
- 7) VAN BROCKLIN L. and DAVID M., Ind. Eng. Chem. Fund., 11, 91 (1972).
- 8) CHAVEZ G., GARCIA C., (Asesor) : "Sistema Cu - Na - Dowex 50 - 8 en lecho fluidizado", Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Química, LUZ (Diciembre 1978).
- 9) The Dow Chemical Company, Dowex, Catálogo "Ion Exchange". Michigan (1960).
- 10) Rohm and Haas Company, "Amberlite Ion Exchange" Resins Laboratory Guide, Philadelphia (1974).

NOMENCLATURA

A	Sección transversal de la tubería de fluidización, cm^2
$C_{z=0}$	Concentración de Iones Cobre en la Solución Original, mg/lt
$C_{z=1}$	Concentración de Iones Cobre en el Efluente, mg/lt
C^*	Concentración de equilibrio de Iones Cobre en Solución, mg/lt
D_p	Diámetro equivalente de las partículas de de resina, cm
$D_{\text{Cu}^{++}}$	Difusividad del ión entrante Cobre, cm^2/sg
J_D	Factor de Chilton-Colburn, $k_T S^{2/3} / u_f$, adimensional

k_{exp}	Coficiente global de transferencia de masa para (cm/sg) la fase líquida según la Ec.(2)
k_T	Coficiente global de transferencia de masa para (cm/sg) la fase líquida según la Ec.(3)
k'_T	Coficiente global de transferencia de masa para (cm/sg) la fase líquida según la Ec.(4)
l	Altura del lecho expandido, cm
N_{Re}	Número de Reynolds basado en la (adimensional) velocidad intersticial, $D_p \rho U_f / \mu$
N_{Sc}	Número de Schmidt, $\mu / \rho D_{\text{Cu}^{++}}$ (adimensional) basado en la difusividad del ión entrante
q	Cantidad de iones Cobre sobre la resina, mg $\text{Cu}^{++}/\text{g-resina}$
Q	Caudal de la solución fluidizante, cm^3/sg
R_{exp}	Factor electrostático de transferencia de masa (adimensional) definido por la Ec. (5)
R'_{exp}	Factor electrostático de transferencia de masa (adimensional) definido por la Ec. (6)
t_f	Tiempo de contacto, segundos
u_f	Velocidad intersticial de la solución, cm/sg
V	Velocidad superficial del agente fluidizante, cm/sg
V_t	Velocidad terminal de la partícula, cm/sg
ϵ	Porosidad del lecho, cm^3/cm^3
μ	Viscosidad absoluta de la solución, g/cm-sg
ρ	Densidad de la solución fluidizante, g/cm ³

Recibido el 21 de febrero de 1984