

# Diseño y construcción de un electrodiализador a escala de laboratorio para la separación del ácido láctico

## Design and construction of a laboratory scale electrodiализer to separate lactic acid

C. Contreras, A. Cárdenas\*  
Laboratorio de Mezclado, Separación y Síntesis Industrial (LMSSI)  
Escuela de Ingeniería Química  
Universidad de los Andes  
\*antoniolcr@hotmail.com

### Resumen

*La electrodiálisis es una técnica que se utiliza para separar iones de diversas corrientes líquidas. El proceso se basa en utilizar membranas con cargas fijas positivas que dejan pasar a los aniones (membranas aniónicas) y membranas con cargas fijas negativas que dejan pasar a los cationes (membranas catiónicas) al aplicárseles un campo eléctrico. De esta forma es posible concentrar los iones en una corriente de alimentación y diluir otra corriente de alimentación. En el Laboratorio de Mezclado, Separación y Síntesis Industrial (LMSSI) existe un módulo tipo K'elf de electrodiálisis en el cual se realizaron estudios de separación de sales y ácido láctico del lactosuero y de soluciones modelo que presenta un rendimiento bajo. Debido a esto, se diseñó y construyó un nuevo equipo de electrodiálisis que aumenta significativamente la eficiencia al compararlo con el equipo tipo K'elf. Esto se logra al aumentar la velocidad de flujo de las corrientes en contacto con las membranas, lo que reduce la capa de polarización de concentración y por ende se mejora significativamente la transferencia de masa, como se demuestra al comparar el porcentaje de remoción del ácido láctico del 26,3% en el equipo K'elf vs un 74% en el equipo diseñado y construido en el LMSSI. El equipo construido obtiene resultados mucho más parecidos a los obtenidos con equipos a escala industrial que el piloto tipo K'elf utilizado anteriormente, lo que permite realizar el escalado con mayor confianza.*

**Palabras claves:** Electrodiálisis, ácido láctico, separación, hidrodinámica.

### Abstract

*Electrodialysis is a technique used to separate ions from liquid solutions. In the process, membranes with positive fixed charges let anions pass and membranes with fixed negative charges let the cations pass when an electric field is applied. In this way some liquid streams can be diluted in ions as other liquid streams are concentrated in ions and a separation is achieved. In the Laboratorio de Mezclado, Separación y Síntesis Industrial (LMSSI) a small pilot module of the K'elf type has been used to separate salts and lactic acid from lactoserum and model solutions presenting a low efficiency of separation. Because of this, a new electrodiализis pilot was designed and constructed which enhances the efficiency if compared with the K'elf model. This is achieved mainly because there is an increase in fluid velocity, which reduces the polarization layer and enhances the mass transfer, as results show: the removal of lactic acid is 26.3% in the K'elf model vs 74% in the equipment built in the LMSSI. The new equipment obtains results closer to the industrial scale equipment, fact that permits a better prediction of the industrial behavior of the fluids treated.*

**Key words:** Electrodialysis, lactic acid, separation, hydrodynamics.

### 1 Introducción

La electrodiálisis es un método que utiliza membranas y permite separar iones de corrientes líquidas mediante la

aplicación de un gradiente de potencial eléctrico. Al aplicársele un potencial eléctrico a un fluido que contiene especies cargadas (iones), los iones positivos (cationes) migrarán hacia el electrodo negativo (cátodo) y los iones

negativos (aniones) migrarán hacia el electrodo positivo (ánodo). Si entre los electrodos se colocan membranas selectivas a los cationes y aniones, entonces es posible separar a estos iones de una corriente, diluyéndola y llevarlos hacia otra corriente en donde estos iones se concentran. De esta manera se tendrán celdas alternadas de concentración y dilución en cuyos extremos tendrán celdas en contacto con los electrodos, llamadas celdas de lavado. En la Fig. 1 se muestra un esquema simplificado de un equipo de electrodiálisis.

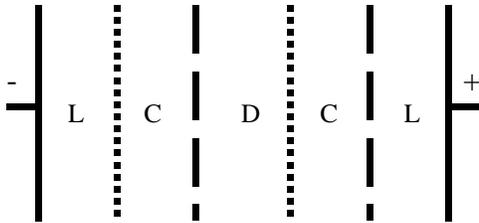


Fig. 1. Esquema de un electrodiálisis. Celdas de lavado L, de dilución D y de concentración C. Cátodo (-) y ánodo (+).

En la Fig. 1, las corrientes líquidas circulan en paralelo con las membranas y electrodos, representados por las líneas continuas (electrodos), las líneas de puntos (membranas aniónicas) y las líneas segmentadas (membranas catiónicas). Al aplicarse un gradiente de potencial eléctrico, los iones que se encuentran en la celda de dilución tienden a migrar hacia los electrodos; los iones positivos atraviesan la membrana catiónica y pasan a la celda de concentración adyacente. Los iones negativos se dirigen hacia el ánodo atravesando la membrana aniónica hacia la celda de concentración contigua. De esta forma la celda de dilución se empobrece en iones y las de concentración se enriquecen. Los iones que se encuentran en las celdas de concentración no pueden salir de ellas debido a que los cationes se encuentran con una membrana aniónica (que posee cargas positivas) que no les permite el paso hacia la celda de lavado. De forma similar sucede con los aniones que se dirigen hacia el ánodo, sólo que en este caso se encuentran con una membrana catiónica. En los arreglos industriales, los pares de celdas de dilución y concentración se repiten, pudiendo alcanzar hasta 1000 pares de celdas (Strathmann, 1992).

Las membranas utilizadas en electrodiálisis son membranas poliméricas que poseen injertados grupos funcionales que les confieren una carga fija. Las membranas aniónicas tienen grupos positivos, generalmente del tipo amonio cuaternario y las membranas catiónicas tienen grupos negativos que son en general grupos sulfónicos ó ácidos carboxílicos (Mulder, 1991; Asahi Glass, 1993).

Las aplicaciones de la electrodiálisis son diversas, pero las principales son la producción de agua potable, la producción de sal de mesa, tratamiento de efluentes de la industria del cromado, producción de agua ultra-pura y el

tratamiento del lactosuero (Avila y col., 2000; Strathmann, 1992). Existen también otras aplicaciones en desarrollo como, por ejemplo, el tratamiento de jugos de fruta, la producción de ácido láctico (Narebska y col., 1998; Yen y col., 1993; Lee y col., 1998) tratamiento de efluentes papeleros y recuperación de ácido cítrico (Novalic y col., 1995).

En este trabajo se intentó modificar un equipo piloto de electrodiálisis tipo K'elf que tiene un rendimiento farádico bajo (menor al 30%) y también se diseñó y construyó un nuevo piloto a escala de laboratorio de un equipo de electrodiálisis con rendimientos muy superiores a los del piloto tipo K'elf y cercanos a los de las instalaciones industriales. Este piloto construido es muy útil, ya que permite predecir con mayor exactitud el comportamiento de los diferentes fluidos tratados con respecto a los equipos industriales. Se utilizaron como fluidos a tratar soluciones de NaCl y ácido láctico. Este último es un insumo importante en la industria de alimentos y farmacéutica que puede obtenerse a partir de la lactosa contenida en el lactosuero (Avila y col., 2000).

## 2 Procedimiento Experimental

Para realizar las experiencias se utilizaron los siguientes materiales y equipos.

### 2.1 Materiales

Se utilizaron para preparar las diferentes soluciones los reactivos siguientes: cloruro de sodio grado analítico al 99,5% (Riedel de Haen), sulfato de sodio anhidro al 99,0 % (Riedel de Haen) y ácido láctico al 88 % (Scharlau Chimie). Se utilizó agua destilada.

Las membranas utilizadas fueron del tipo: Ionclad RF 4010 (catiónica), Ionclad RF 4030 (aniónica) de Pall Gelman y CM1 (catiónica), AFN (aniónica) de Tokuyama Soda.

### 2.2 Equipos

Se utilizó un equipo tipo K'elf de cinco celdas, dos de lavado, una de dilución y dos de concentración. Las celdas están separadas por cuatro membranas, dos catiónicas y dos aniónicas con un área de 38,6 cm<sup>2</sup> y una separación entre ellas de 15 mm. El equipo posee dos electrodos conectados a una fuente de poder Hewlett Packard (0-15 A, 0-24 V) que permite ajustar el voltaje o la intensidad de corriente. Para aumentar la velocidad de flujo, se rellenaron los espacios entre membranas con anillos de polimetacrilato de metilo. Luego, este equipo se modificó sustancialmente cambiando las celdas por un sistema de espaciadores de camino tortuoso con un área efectiva de membrana de 49,7 cm<sup>2</sup> y un espaciamiento entre membranas de 2,6 mm. El equipo modificado (denominado MPCC) puede tener hasta 7 celdas y 8 membranas para un área total de transferencia

de 400 cm<sup>2</sup>. Para el maquinado de los espaciadores se utilizó una fresadora de precisión y para los canales del distribuidor y la comunicación entre canales se usó una fresadora Dremel de velocidad variable. Todos los pilotos tienen cuatro bombas centrífugas March de 1/55 caballos de potencia.

Para medir la diferencia de potencial en los equipos se utilizó un multímetro Textronics conectado en paralelo y para medir la intensidad de corriente un multímetro Samsung conectado en serie. La conductividad de las soluciones se midió con un conductímetro Metrohm-Herisau 664 y una celda de conductividad con una constante de 0,74 cm<sup>-1</sup>. Las concentraciones de NaCl y de ácido láctico se determinaron a partir de las medidas de conductividad, utilizando una curva patrón.

### 2.3 Procedimiento

Se hicieron varias pruebas con el equipo K'elf con soluciones de NaCl 0,1 N, solución de lavado de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,2 M y una corriente fija de 300 mA, en ciclo cerrado con recirculación. La capacidad de cada circuito fue de 450 ml. Estas pruebas se repitieron con el equipo K'elf, pero esta vez relleno con anillos de polimetacrilato de metilo para aumentar la velocidad y generar mayor turbulencia en el fluido.

Luego se diseñó y construyó el equipo MPCC, con el cual se realizó la separación de NaCl 0,1 N, con una intensidad de corriente de 300 mA y con 1, 2 y 3 pares de celdas de dilución.

Finalmente, se trató suero del queso tipo Bonsalut (lácteos Santa Rosa) adaptando el procedimiento utilizado por R Avila, (Avila, R, 1998) con el objeto de comparar el rendimiento y separación de las sales y ácido láctico bajo las mismas condiciones, a saber: NaCl 0,5 N en el circuito de concentración y solución de lavado de 0,2 M de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

## 3 Resultados y discusión

Los resultados se pueden dividir en tres partes: la comparación entre el equipo K'elf con los espaciadores con relleno (promotores de turbulencia) y sin relleno, los resultados del equipo MPCC diseñado y construido en el laboratorio y la comparación entre el equipo tipo K'elf y el MPCC en el tratamiento del suero Bonsalut.

### 3.1 Comparación entre el equipo K'elf con y sin promotores de turbulencia

Se hicieron varias experiencias con las celdas de dilución y concentración operando con soluciones de NaCl con una concentración inicial de 0,1 N. En un primer caso, las celdas del equipo K'elf no contienen promotores de turbulencia y la velocidad de flujo es del orden de 5 cm/s. Esto hace que se forme una capa límite ancha que disminuye la transferencia de masa.

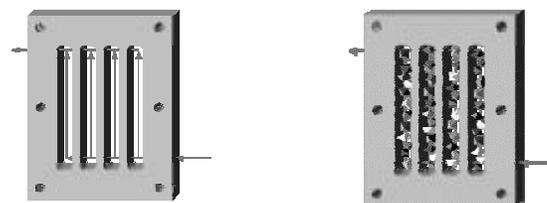


Fig. 2. Espaciadores del equipo K'elf, con promotores de turbulencia (derecha) y sin promotores de turbulencia (izquierda)

La Fig. 2 muestra los espaciadores del equipo K'elf. El de la izquierda sin promotores de turbulencia tal como es el equipo original. Para intentar mejorar la transferencia de masa, se relleno el espaciador con promotores de turbulencia con forma de anillos para disminuir el área de flujo del fluido y aumentar de esta manera la velocidad de flujo (manteniendo el caudal volumétrico constante) y disminuir la capa de polarización. Las experiencias para comparar se realizaron con una corriente constante de 300 mA, variando el voltaje de la fuente de poder.

Los resultados indican que no hay una mejora en la transferencia de masa, aún cuando la velocidad de flujo aumenta por una disminución del área de flujo. La Fig. 3 muestra los resultados de la celda de dilución, tanto para el caso con lecho como sin lecho.

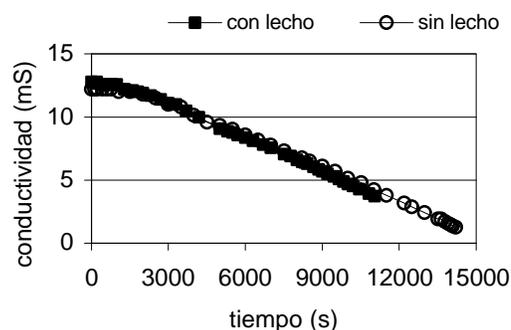


Fig. 3. Concentración del NaCl en la celda de dilución vs tiempo en el equipo sin lecho y con promotores de turbulencia (lecho)

La Fig. 3 muestra que no hay una diferencia significativa en la separación del NaCl al agregarle promotores de turbulencia a las celdas del equipo tipo K'elf. En tiempos similares el empobrecimiento de la solución a diluir es casi el mismo. Sin embargo, en la operación sin lecho es posible operar por más tiempo debido a que la resistencia del equipo es menor. Este comportamiento se puede atribuir a que el lecho es no conductor y a que parte de la celda está ocupado por éste. Esto disminuye la conductividad global de la celda y además, al estar el lecho en contacto con la membrana, el área de transferencia se hace menor. Estos dos efectos compensan el aumento de velocidad del fluido a través de

la celda y por ende, lo que se gana al aumentar la turbulencia (menor capa de polarización, mejor transferencia) se pierde al aumentar la resistencia global de la celda y disminuir el área de transferencia de la membrana.

Debido a los resultados anteriores se decidió modificar completamente el diseño del equipo y construir nuevos espaciadores.

### 3.2 Operación del equipo MPCC construido en el laboratorio

Para lograr aumentar la turbulencia del fluido, se diseñó un espaciador de tipo paso tortuoso con una separación entre membranas de 2,6 mm. Esto reduce significativamente el área de flujo y disminuye la capa de polarización de concentración. Además se logró con este diseño aumentar el área de transferencia manteniendo siempre el mismo alto y ancho del equipo, ya que los electrodos limitan la construcción a este tamaño. En la Fig. 4 se muestra un esquema del espaciador.

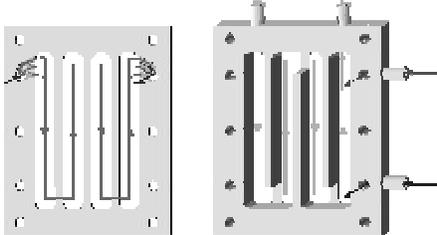


Fig. 4. Espaciador del equipo MPCC de paso tortuoso. Derecha espaciador de electrodos.

Con este espaciador la velocidad del fluido aumenta a 71 cm/s, lo que mejora significativamente la transferencia de masa al disminuir la capa de polarización. La Fig. 5 muestra la resistencia del equipo para las tres configuraciones estudiadas.

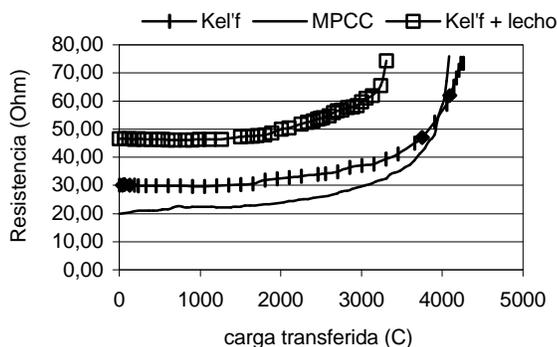


Fig. 5. Comportamiento de la resistencia con respecto a la carga transferida para los tres arreglos estudiados.

En la Fig. 5 se muestra que para todos los casos hay un aumento de la resistencia con la transferencia de carga (que

es proporcional al tiempo). Este aumento de resistencia se debe a que a medida que se empobrece en iones la solución a diluir, su resistencia aumenta, hasta llegar a incrementarse de manera muy brusca, como lo muestra la Fig. 5. Si la resistencia se hace muy grande, llega un momento en el cual la fuente de poder no puede satisfacer el gradiente de potencial necesario para poder mantener una intensidad de corriente. También ocurre, que si se desea mantener un flujo de corriente fijo debido al transporte de iones y éstos no se encuentran en cantidad suficiente, como por ejemplo en la celda de dilución si se ha empobrecido mucho, entonces se produce la hidrólisis del agua que genera protones e hidroxilos para compensar esta falta de iones. Es evidente que en el caso de la electrodiálisis, la hidrólisis del agua no es deseable ya que se pierde energía por esta reacción y no se utiliza en el transporte y separación de los iones. Cuando ocurre la hidrólisis del agua, el rendimiento farádico (que es la cantidad de carga transportada por iones que se separan entre la carga total introducida) del equipo disminuye apreciablemente.

El equipo que presenta la mayor resistencia es el que tiene promotores de turbulencia, que como se explicó anteriormente presenta la resistencia inicial mayor. La celda K'elf presenta una resistencia inicial intermedia entre la K'elf con lecho y la MPCC. Esta resistencia se debe fundamentalmente a la formación de una capa de polarización y a una distribución del fluido en la misma no uniforme, haciendo que haya áreas de membrana que sean muy ineficientes. La Fig. 2 muestra que la distribución de flujo se hace con una sola entrada hacia diferentes canales, lo cual es hidráulicamente ineficiente y se demostró experimentalmente al estudiar el flujo utilizando tapas transparentes para observar la distribución de flujo en el espaciador. El equipo diseñado en el laboratorio (MPCC) es el que presenta la menor resistencia inicial, siendo un 33% menor que la del equipo K'elf. Esto se atribuye a una mejor distribución de flujo, ya que se obliga al fluido a seguir un solo canal (Fig. 4) y se aumenta significativamente la velocidad a 71 cm/s, con las mismas bombas utilizadas en el equipo K'elf. Este aumento de velocidad disminuye la capa de polarización y por ende favorece la transferencia de masa (Strathmann, 1992). Otra diferencia importante entre el equipo K'elf y el MPCC es que en el primero hay tendencia hacia la retención de gases (generados por reacciones en los electrodos, como  $\text{Cl}_2$  y  $\text{H}_2$ ) que disminuyen el área efectiva de los electrodos y por ende la eficiencia global del equipo. Esta retención se disminuye al hacer el flujo del fluido por un solo paso y de esta forma se arrastra el gas de las celdas de lavado.

Otra ventaja del equipo MPCC sobre el K'elf es que como el ancho de las celdas es mucho menor (2,6 mm vs 15 mm) se puede instalar un mayor número de membranas en el mismo espacio, lo que aumenta la eficiencia por volumen de equipo. También se demostró que la transferencia es proporcional al área de membranas como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Separación de NaCl con área de membrana distinta.

Area total	% Separación	Tiempo	Rendimiento Farádico
100 cm <sup>2</sup>	98	4470 s	97 %
200 cm <sup>2</sup>	98	6670 s	100 %
300 cm <sup>2</sup>	96	13600 s	99 %

Para un porcentaje de separación casi igual, el tiempo es proporcional al área de membrana. Además, se observa que los rendimientos farádicos son casi del 100%, superiores a los requeridos para el funcionamiento de un equipo comercial que debe ser mayor al 80%. El alto porcentaje de separación se debe a que la experiencia se realizó con NaCl, un electrolito fuerte y con iones relativamente pequeños fáciles de separar, estos rendimientos pueden disminuir dependiendo del tipo de electrolito.

### 3.3 Comparación entre el equipo MPCC y el K'elf en el tratamiento del suero Bonsalut

El Bonsalut es un suero que se obtiene al producir el queso del mismo nombre. Este suero contiene ácido láctico y cenizas (gran parte es NaCl). En este caso se trató este suero con el equipo MPCC y sus resultados se compararon con los resultados obtenidos anteriormente con el equipo K'elf (Avila, R, 1998). El resumen de los resultados se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Comparación entre el equipo K'elf y el MPCC en el tratamiento del suero Bonsalut

Equipo	Acidez % remoción	Cenizas % remoción	Rendimiento Farádico
K'elf	26,3	26,7	25,9 %
MPCC	74,0	91,0	94,0 %

Como se indica en la tabla, el equipo MPCC es mucho mas eficiente que el equipo K'elf. Es mas, el rendimiento farádico del equipo K'elf esta muy por debajo del rendimiento que debe tener un equipo comercial (no menor al 80 %) y debido a este bajo rendimiento observado en estudios anteriores (Avila, R, 1998; Peña, D, 2000) fue que se decidió diseñar y fabricar un nuevo equipo. El equipo construido tiene un rendimiento farádico del 94 % que lo coloca en el orden de los equipos industriales. Este resultado sugiere su utilización en pruebas piloto con mayor confiabilidad que el equipo K'elf. Es importante señalar que el porcentaje de remoción de cenizas se calculó suponiendo a las cenizas como NaCl.

La separación de los compuestos del lactosuero en el MPCC se llevó desde una conductividad de 8,62 mS hasta 0,31 mS. Esta separación se puede dividir en tres zonas, una inicial en donde el transporte de iones es mayor (mayor

pendiente), luego una segunda zona con pendiente intermedia y una zona final con una pendiente menor. Esto se muestra en la Fig. 6.

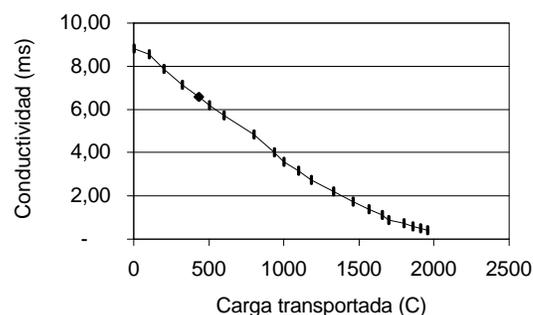


Fig. 6. Conductividad (miliSiemens) vs carga transportada (Coulombs) en el tratamiento del suero Bonsalut.

La mayor pendiente es probablemente debido a que el transporte de iones se hace por dos mecanismos, la difusión debido a un gradiente de concentración y la electrodiálisis debido al gradiente de potencial eléctrico (Avila, R, 1998; Peña, D, 2000). Una vez que el gradiente de concentración se pierde, hay solamente transporte por gradiente eléctrico, por lo que la velocidad de transferencia de masa disminuye y en la última zona, la resistencia se hace muy grande y el rendimiento farádico disminuye, así como la transferencia de masa.

## 4 Conclusiones

Se diseñó y construyó un equipo que supera en mucho el rendimiento del equipo K'elf existente en el laboratorio. Al aumentar la velocidad de flujo, el rendimiento farádico se incrementó significativamente. El rendimiento farádico obtenido en la separación del NaCl es muy bueno entre el 97 y 100 %.

La inclusión de un lecho de relleno no conductor en el equipo K'elf, aunque aumenta la velocidad de flujo, no mejora su eficiencia debido al aumento de la resistencia eléctrica y a la disminución del área efectiva de las membranas.

El porcentaje de separación de cenizas y ácido láctico del suero Bonsalut con el equipo MPCC es alto, de 91 % para las primeras y de 74 % para el segundo.

## 5 Agradecimientos

Se agradece la colaboración del CDCHT de la Universidad de los Andes por el financiamiento de este proyecto.

## Bibliografía

Asahi Glass Company, 1993, Demineralization and purification of organic substances by electrodiálisis, Asahi

Glass Company, Tokio.

Avila R, 1998, Desalinización y desacidificación del suero lácteo mediante electrodiálisis, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida.

Avila R, Cárdenas A y Medina A, 2000, Tratamiento del lactosuero utilizando la técnica de electrodiálisis, *Interciencia*, Vol 25, N° 2, 80-84.

Lee E, Moon S, Chang Y, Yoo I, Chang H, 1998, Lactic acid recovery using two-stage electrodiálisis and its modelling., *J. Membrane Science*, Vol 145, 53-66.

Mulder M, 1991, Basic principles of membrane technology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Narebska A, Kurantowicz M, 1998, Separation of fermentation products by membrane techniques. II

Conversion of lactate to lactic acid by electrodiálisis, *Separation Science and Technology*, Vol 33, N° 7, 959-973.

Novalic S, Jagschits F, Okwor J y Kulbe K, 1995, Behaviour of citric acid during electrodiálisis, *J. Membrane Science*, Vol 108, 201-205.

Peña D, 2000, Separación del ácido láctico por electrodiálisis, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida.

Strathmann H, 1992, Electrodiálisis, Cap. 5 en *Membrane handbook*, W Ho y K Sirkar editores, Van Nostrand-Reinhold, Nueva York.

Yen Y and Cheyran M, 1993, Electrodiálisis of model lactic acid solutions, *J. Food Engineering*, Vol 20, 267-282.