

Lactic acid separation from fermented whey using electro dialysis

Ana Machado, Leopoldo Gorrochotegui y Antonio Cárdenas*

Laboratorio de Mezclado, Separación y Síntesis Industrial, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. antonioc@ula.ve

Abstract

In this work, the acid separation from Bonsalut cheese fermented whey, with an Asahi Glass Co electro dializer, model CH-0, was studied. Sweet whey was used and was fermented under laboratory conditions (temperature range 18-24°C). The whey was characterized by titrable acidity, pH, conductimetry, proteins by the Kjeldahl method, fats by the Gerber method, lactose by picric acid photometry and sodium and potassium by atomic absorption. The de-acidification was followed by conductimetry, pH measurements and titrable acidity. The results show that it is possible to separate 78% of the acid and 90% of the salts. They also show that the salts are separated first, because the ions of the salts have a higher mobility than the ions of the acid, which is mostly lactic acid. These results suggest that to separate lactic acid from fermented whey with a high concentration of salt the process should be carried out in two steps, the first to separate the salt and the second to obtain the acid.

Key words: Whey, lactic acid, electro dialysis, separation.

Recuperación del ácido láctico de suero lácteo fermentado utilizando la técnica de electrodiálisis

Resumen

En este trabajo se estudió la des-acidificación del suero lácteo fermentado obtenido a partir de la fabricación del queso Bonsalut, por medio de un electro dializador modelo CH-0 de Asahi Glass Co. Se evaluó un suero dulce que se fermentó en condiciones ambientales de laboratorio, aproximadamente a una temperatura en el rango de 18-24°C. El suero se caracterizó utilizando las técnicas de acidez titulable, pH, conductimetría, grasa por Gerber, proteínas por Kjeldahl, la lactosa por el método fotométrico con ácido pícrico, sodio y potasio por absorción atómica. El seguimiento de la operación de desalado y des-acidificación se hizo por acidez titulable, conductimetría y pH. Los resultados obtenidos indicaron que es posible des-acidificar el suero en un 78% y que se puede desalar en un 90%. Además, se observó que el desalado ocurrió antes que la des-acidificación debido a que los iones que componen las sales, tienen mayor movilidad que los que componen el ácido, el cual es fundamentalmente ácido láctico. Los resultados sugieren, que para separar el ácido láctico de sueros salados, se debe hacer un proceso en dos etapas, primero se debe desalar el suero y luego des-acidificar.

Palabras clave: Suero lácteo, ácido láctico, electrodiálisis, separación.

Introducción

La técnica de electrodiálisis permite separar iones de soluciones mediante el uso de membranas permeables a los aniones y cationes utili-

zando un gradiente de potencial eléctrico. Para ello las membranas se colocan de forma alterna, formando celdas. En los extremos de las celdas, se colocan los electrodos, ánodo y cátodo, que generan la diferencia de potencial eléctrico que per-

mite el movimiento de los iones y su separación [1]. Las celdas adyacentes se comportan, unas como de dilución, en las cuales la concentración de iones disminuye (se empobrecen en iones) y otras de concentración, en donde se concentran los iones. Esto implica que existen al menos dos circuitos hidráulicos, uno de la solución que se diluye (diluido) y otro de la solución que se concentra (concentrado). Además, hay un tercer circuito que consiste en una solución que contiene iones de difícil oxidación y reducción que esta en contacto con los electrodos y se conoce como solución de lavado. En los electrodiálizadores industriales, el número de pares de celdas puede estar entre 100 y 500 [2].

El suero lácteo es un subproducto de la producción de mantequilla y queso que contiene cantidades importantes de lactosa, proteínas, calcio y fosfatos, entre otros compuestos [3]. En general, el suero lácteo no puede consumirse directamente, ni utilizarse en la elaboración de otros productos lácteos sin un tratamiento previo. El suero lácteo no puede desecharse directamente al ambiente por su alto poder contaminante debido a su gran demanda bioquímica de oxígeno [1]. Uno de los tratamientos más utilizados es la desmineralización del suero lácteo utilizando electrodiálisis. Para 1993 en la industria láctea se utilizaban equipos para desalar el suero con un área de membranas de 250.000 m² [4]. Otra aplicación es la recuperación del ácido láctico obtenido a partir de la fermentación del suero lácteo. Este ácido se puede obtener a partir de la transformación de la lactosa que contiene el suero lácteo [5-7]. El ácido láctico se disocia en un protón (catión) y en el ión lactato (anión). Debido a esta disociación en iones, es posible su separación mediante la técnica de electrodiálisis como ácido láctico [8, 9] o como lactato de sodio [10]. El ácido láctico se utiliza como acidulante y preservativo de alimentos así como en la producción de polímeros [8, 11] y es un producto de gran consumo industrial. Otros ácidos orgánicos, como el ácido cítrico [12] ácido fórmico [13] o varios ácidos orgánicos mezclados [14] también son susceptibles de ser separados por electrodiálisis.

En este trabajo se estudia la des-acidificación del suero lácteo (previamente fermentado) y el efecto de la presencia de sal en el suero, con un electrodiálizador piloto modelo CH-0 de Asahi

Glass, con el objeto de recuperar el ácido láctico producido durante la fermentación.

Parte Experimental

Para la des-acidificación del suero lácteo se utilizó un equipo piloto de electrodiálisis, modelo CH-0, fabricado por la empresa japonesa Asahi Glass Co., LTD. Un esquema del equipo se muestra en la Figura 1.

El electrodiálizador consta de tres circuitos hidráulicos diferentes: el circuito de concentración, el circuito de dilución, que en este caso es el suero lácteo y el circuito de lavado por donde circula la solución que esta en contacto con el cátodo y el ánodo. Las características del equipo se muestran en la Tabla 1.

Los tres circuitos se alimentan con bombas (Iwaki Pumps) con una descarga máxima de 32-38 L/min y un cabezal máximo de 3,8-5,4 m de agua. Cada circuito consta de un rotámetro con rango de medición entre 30 y 300 L/h. La fuente que genera la diferencia de potencial eléctrico es marca Kikusi, modelo 350W-PAN35-10 A, con un voltaje máximo de salida de 35 V y una intensidad de corriente máxima de 10 A.

Para la des-acidificación se utilizó un suero lácteo obtenido a partir de la producción del queso Bonsalut, fabricado por Lácteos Santa Rosa, Mérida, Venezuela. El suero se dejó fermentar por periodos de entre 30 y 55 días, bajo condiciones ambientales de laboratorio, cuya temperatura oscila entre 18 y 24°C. Tanto al suero fresco como al suero fermentado se le midió la acidez titulable para observar el efecto de la fermentación sobre este parámetro relacionado con la cantidad de ácido en el suero. La acidez titulable se expresó en gramos por litro de ácido láctico y se obtuvo titulando el suero lácteo con NaOH (EKA Chemical, PA) 0,1 N y fenolftaleína como indicador.

Antes de realizar los experimentos de des-acidificación, se procedió a determinar la corriente límite. La corriente límite es aquella sobre la cual el proceso de separación se vuelve ineficiente debido a que comienza la hidrólisis del agua, ya que los iones a separar, a este nivel de corriente, no tienen la suficiente capacidad de transporte de carga y ésta es suministrada por los protones y oxidrilos producidos en la hidrólisis

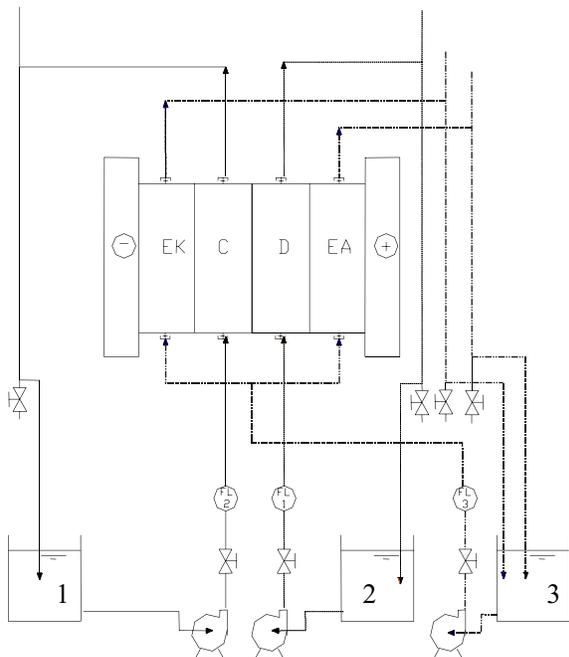


Figura 1. Esquema del electrodiálizador utilizado para des-acidificar el suero lácteo.

Se muestran tres circuitos hidráulicos:

- 1: solución de concentrado; 2: solución de diluido (suero láctico fermentado) y 3: solución de lavado de los electrodos.

del agua [15]. Para determinar este nivel de corriente se modificó del electrodiálizador con el objeto de mezclar las corrientes de diluido y concentrado y así realizar la operación a concentración constante (la corriente límite depende de la concentración de los iones). Se utilizó el suero

fresco para determinar la corriente límite a diferentes caudales de suero lácteo. Este suero se utilizó debido a que es el que posee menor concentración de iones y representa el peor escenario para calcular la corriente límite. En este experimento se utilizó el suero fresco tanto en la corriente de concentrado como de diluido. Como corriente de lavado se utilizó, en todos los experimentos, una solución al 3,5% de sulfato de sodio (Riedel de Haen, PA) con un pH entre 2 y 3, ajustado con ácido sulfúrico concentrado (J T Baker, 96,5%). Para cada caudal de suero lácteo, se realizó un barrido de intensidad de corriente versus voltaje y con estos datos se determinó la corriente límite.

Para la des-acidificación del suero lácteo fermentado se colocó el suero en el circuito de diluido, una solución de ácido láctico (Scharlau, 88-90%, PA) con una concentración inicial similar a la del suero fresco en la corriente de concentrado y la solución de lavado de composición igual a la descrita anteriormente en el circuito de lavado. Una vez que las corrientes se encontraron circulando a los caudales deseados, se fijó la intensidad de corriente eléctrica al 80% de la corriente límite. Durante la corrida experimental se midió el pH, la conductividad y la acidez titulable en el tiempo. Al alcanzar el nivel de des-acidificación deseado, se cortó el flujo de corriente eléctrica en el equipo y se detuvo la circulación de las soluciones. El experimento se repitió agregando 20 g/L de NaCl (Riedel de Haen, PA) al suero fermentado para estudiar el efecto de la sal en la des-acidificación.

Tabla 1
Características del electrodiálizador

Modelo del Equipo	CH-0
Número de pares de membranas	10
Tipo de membrana	Membranas aniónicas: AMV (estándar) Membranas catiónicas: CMV (estándar) Fabricadas por Asahi Glass Co
Número de celdas de separación	20
Dimensiones de las membranas	160 mm ancho × 240 mm largo
Área efectiva de las membranas	0,021 m ²
Espesor del espaciador	0,75 mm
Material del ánodo	Pt/Ti
Material del cátodo	Acero SUS316

Al final de cada experimento el equipo se lavó de forma consecutiva con agua potable, con una solución de jabón, con una solución de NaOH al 0,5% y con agua potable.

Las medidas de pH se realizaron con un pH-metro marca Metrohm, modelo 620 y se utilizaron soluciones buffer de pH 4 y 7 para su calibración. Las medidas de conductividad se realizaron con un conductímetro modelo CMD210 de Radiometer Analytical, provisto de una celda de conductividad modelo CDC641T con sensor de temperatura.

La grasa de suero lácteo fresco se determinó por el método de Gerber [16], las proteínas por el método de Kjeldahl, agregando una mezcla catalítica conformada por 4% de CuSO_4 (CER-diagnóstico, 98,8%) y 96% de K_2SO_4 (B&A, PA) [16], la lactosa por el método fotométrico con ácido pícrico [16]. Para determinar el contenido de sólidos o extracto seco del suero así como también su contenido de sales minerales o cenizas, antes y después de ser tratado, se realizó un análisis que se fundamenta en la evaporación total del agua a 105°C , de una muestra de peso conocido y la pesada del residuo seco (materia orgánica e inorgánica), luego este residuo seco es incinerado a una temperatura cercana a los 550°C y por último se vuelve a pesar el residuo resultante, el cual estaría constituido por la materia inorgánica de la muestra.

Las cantidades de sodio y potasio presentes en el suero fresco se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica, utilizando un equipo marca Varian modelo Spectra 55B.

Discusión de Resultados

En este estudio se utilizó suero del tipo dulce, proveniente de la producción de queso Bonsalut, obtenido por vía enzimática, agregando cuajo, sin acidificación. En la Tabla 2 se muestran las principales características del suero fresco sin fermentar. Los valores de los parámetros que se presentan corresponden a los promedios de los valores obtenidos para los sueros utilizados en este estudio, los cuales fueron recogidos en días diferentes. La desviación estándar calculada para cada parámetro indica que no hay diferencia entre los sueros frescos utilizados.

La conductividad de sueros frescos utilizados presentó valores similares: 5,54; 5,51 y 5,69 mS/cm.

La corriente límite es la corriente sobre la cual el proceso de separación se vuelve ineficiente [2]. Para determinar la corriente límite se utilizó suero de leche fresco el cual representa el peor escenario posible ya que contiene la menor cantidad de iones. El suero fresco se hizo pasar tanto por el circuito de diluido como por el de concentrado. Se comprobó que existía un buen mezclado al medir la conductividad de ambos circuitos, siendo prácticamente iguales, con diferencias máximas entre ellas de 0,02 mS/cm.

La corriente límite se calculó con el método de Cowan y Brown [17], graficando la resistencia (V/I) contra el inverso de la intensidad de corriente ($1/I$), para cada flujo de suero lácteo, tal como se muestra en la Figura 2 para un flujo de suero lácteo de 150 L/h.

Tabla 2
Características del suero lácteo fresco utilizado

Parámetro	Valor promedio \pm desviación estándar
pH	6,32 \pm 0,15
Grasa (% p/p)	0,64 \pm 0,09
Sólidos Totales (% p/p)	6,67 \pm 0,29
Cenizas (% p/p)	0,52 \pm 0,03
Acidez Titulable ($\text{g}_{\text{ac. láctico}}/\text{L}_{\text{suero}}$)	1,10 \pm 0,12
Proteínas (% p/p)	0,96 \pm 0,21
Lactosa ($\text{g}/\text{L}_{\text{suero}}$)	45,91 \pm 2,63
Sodio ($\text{g}/\text{L}_{\text{suero}}$)	0,45 \pm 0,01
Potasio ($\text{g}/\text{L}_{\text{suero}}$)	2,23 \pm 0,16

La corriente límite corresponde al punto de intersección de las dos rectas, que en este caso corresponde a 2,70 amperios ($1/I = 0,37$). Como se tomó el suero lácteo fresco como referencia para la corriente límite, ésta se hace independiente de la concentración, pero depende de la velocidad de flujo, debido a que ésta determina el espesor de la capa de polarización de concentración. A mayor velocidad de flujo, mayor es el valor de la corriente límite (I_{lim}), tal como se muestra en la Tabla 3.

El suero lácteo se dejó fermentar en las condiciones del laboratorio, a temperatura ambiente por un periodo de entre 30 días y 55 días. Dado que el objetivo de este estudio es la separación del ácido del suero de la leche mediante la electrodiálisis, se midió la acidez titulable antes y después del proceso de fermentación. En la Tabla 4 se muestra el cambio en las condiciones del suero utilizado mediante la acidez titulable antes y después de la fermentación.

A medida que se fermenta el suero lácteo, se produce ácido láctico que incrementa de manera significativa la cantidad de ácidos orgánicos presentes. La mayor cantidad de ácido se obtiene, en general, con mayores tiempos de fermentación (50 días vs 30 días). Sin embargo, como no se hizo la fermentación bajo condiciones controladas, hay diferencias en las cantidades producidas en los 50, 52 y 55 días, como lo muestran los resultados con sus respectivas desviaciones estándar. La Tabla 4 muestra tres lotes de suero fresco, que se fermentaron, cada lote en el mismo periodo de tiempo, por ello el primer lote produce resultados iguales (se fermentó en el mismo pe-

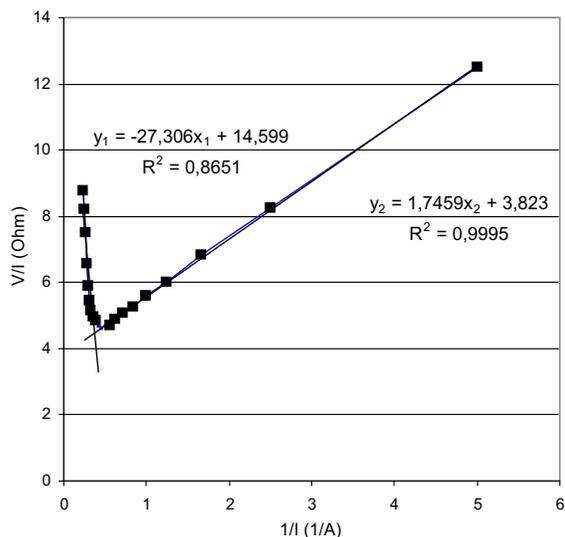


Figura 2. Determinación de la corriente límite del suero lácteo fresco con un caudal de 150 L/h.

Tabla 3
Corriente límite promedio por flujo volumétrico de suero lácteo fresco

Flujo (L_{suero}/h)	I_{lim} (A)
50	1,67
100	2,14
150	2,60
200	2,88
250	3,23
300	3,48

Tabla 4
Condiciones del suero lácteo antes y después de fermentado

Suero Fresco		Suero Ácido		
Acidez Titulable (g/L)	Sólidos Totales (%)	Tiempo de Fermentación (días)	Acidez Titulable (g/L)	Ác. Láctico Producido por Fermentación (%)
1,33 ± 0,04	6,15	30	7,00 ± 0,03	81,05
1,33 ± 0,04	6,15	30	7,00 ± 0,03	81,08
0,97 ± 0,03	6,24	50	15,64 ± 0,04	93,77
0,93 ± 0,03	6,55	50	20,30 ± 0,04	95,40
0,93 ± 0,03	6,55	52	20,58 ± 0,03	95,46
0,97 ± 0,03	6,24	55	18,11 ± 0,02	94,62

riodo de tiempo y por el mismo tiempo). El lote cuya concentración inicial fue de 0,97 g/L de acidez titulable produce a los 50 días un suero fermentado con una acidez de 15,64 g/L y a los 55 días un suero con 18,11 g/L. De manera similar se comporta el lote que inicialmente tiene una acidez titulable de 0,93 g/L, aunque produce mayor cantidad de ácido.

Las diferencias observadas en la fermentación del suero lácteo pueden ser debidas a los cambios en las condiciones ambientales, especialmente cambios en la temperatura, que no fueron exactamente iguales para los tres lotes estudiados.

En este estudio el objetivo principal es estudiar la factibilidad de separar los ácidos orgánicos del suero lácteo por medio de la electrodiálisis, por lo que se tomó como variable fundamental la acidez titulable, tanto del diluido como del concentrado, antes y después del proceso de separación de los ácidos.

El ácido láctico es el componente mayoritario de los ácidos orgánicos formados en el suero lácteo. La cantidad teórica de ácido láctico que se puede producir en la fermentación se calculó a través de la reacción de descomposición de la lactosa en glucosa y galactosa y luego de la glucosa en ácido láctico. Esto indica que por cada mol de lactosa, se forman dos moles de ácido láctico. Si se toma el promedio de lactosa en los sueros lácteos utilizados de 45,91 g/L, el máximo teórico de ácido láctico producido sería de 24,16 g/L. En la

práctica, esto no ocurre y se obtienen rendimientos de alrededor de un 85% en los mejores casos, como en la fermentación de 52 días mostrada en la Tabla 4. No es posible obtener un rendimiento del 100% debido a que parte del carbono de la fuente se utiliza para crecimiento y mantenimiento celular.

Una vez fermentado el suero, se procedió a la des-acidificación del mismo. Los resultados de la des-acidificación del suero lácteo a diferentes condiciones de caudal se muestran en la Tabla 5. Las intensidades de corriente utilizadas varían con el caudal, debido a que se operó a un 80% de la corriente límite (valor este que depende del caudal). Se observa en todos los casos, una disminución de la conductividad del suero lácteo (L_D) desde el inicio del proceso hasta el final y al mismo tiempo un aumento de la conductividad de la corriente de concentrado. Esto es de esperarse, ya que se transfieren iones de la corriente de suero lácteo (diluido) hacia la de concentrado. También se observa que a medida que se incrementa el flujo en el electrodializador, se incrementa el porcentaje de separación de iones del suero lácteo. Estos iones provienen principalmente de sales (como NaCl) y ácido láctico.

La Tabla 5 también muestra el incremento de la acidez titulable en el concentrado, que corrobora el paso de ácido de la celda de diluido (suero lácteo) hacia la celda de concentrado (que inicialmente es una solución de ácido láctico). El incremento en el rendimiento de los experimen-

Tabla 5
Des-acidificación del suero de leche a diferentes flujos, condiciones de caudal y características del concentrado obtenido

Caudal (L/h)	Tiempo (min)	Velocid. transfer. (g/min)	i_{trabajo} (A)	Diluido (Suero)				Concentrado			
				L_D (mS/cm)		Des-acidific. (%)	Desalado (%)	L_C (mS/cm)		Acidez (g/L)	
				Inicial	Final			Inicial	Final	Inicial	Final
50	32	0,11	1,32	6,810	1,254	52,94	80,1	1,438	8,170	3,16	6,72
100	24	0,16	1,75	6,710	1,307	56,86	85,43	0,971	7,150	2,88	6,72
150	39,22	0,34	2,07	7,190	0,730	75,76	85,71	0,691	7,780	1,37	14,82
200	28,78	0,38	2,33	6,820	0,588	68,42	93,14	0,756	7,760	1,37	12,35
250	36,77	0,44	2,56	7,070	0,654	74,32	89,06	0,683	7,880	1,65	17,83
300	31,95	0,47	2,76	6,740	0,879	78,67	87,51	0,722	6,790	1,92	17,01

tos que se realizaron a mayor flujo se debe a una capa de polarización de menor concentración a altos flujos y a una corriente de operación mayor (mayor velocidad de movimiento de los iones). Esto se puede comparar, para todos los casos con la velocidad de transferencia de masa, calculada en gramos por minuto, que aumenta a medida que se incrementa la intensidad de corriente aplicada.

En la Tabla 5 se observa que la desmineralización (separación de sales) es superior a la des-acidificación, debido a que la movilidad de los iones que componen a la sal es mayor que la de los iones que componen los ácidos. Para demostrar estos resultados se agregó NaCl a un suero fermentado y se realizó un experimento cuyos resultados se muestran en la Figura 3, que representa la acidez titulable en función del tiempo de des-acidificación.

En la Figura 3 se observa que al inicio del proceso, la acidez es casi constante, para la corrida a 250 L/h hasta aproximadamente los 40 minutos y de unos 50 minutos para la corrida a 200 L/h. Esto revela la poca transferencia de ácido del suero fermentado y salado (20 g de NaCl/L) al inicio, sin embargo, se observó una disminución continua de la conductividad en la celda de suero lácteo y un aumento de la misma en la de concentrado. Esto indica que en todo momento hay una transferencia de iones, pero que al principio se transfiere principalmente la sal y una vez que esta disminuye, empieza a separarse el ácido láctico (a los 40 y 50 minutos).

Estos resultados sugieren que es mejor producir ácido láctico a partir de sueros no salados, para minimizar la cantidad de sal que puede contaminar al ácido láctico y el consumo de energía que conlleva la extracción de sal. Sin embargo, para sueros fermentados con alto contenido de sal se puede extraer la sal al principio y una vez extraída la sal, en el punto en el cual comienza la disminución de la acidez titulable, se comience el proceso para extraer el ácido láctico.

Como se puede observar, la electrodiálisis es una técnica eficiente para desacidificar al suero lácteo fermentado y es posible, al acoplarla a un fermentador, mantener la producción por periodos largos de tiempo, ya que elimina continuamente el ácido láctico e impide que las bacterias que lo producen se inactiven y se detenga el proceso.

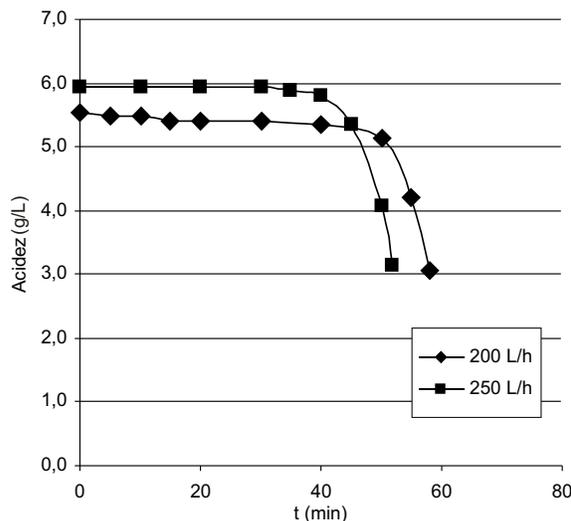


Figura 3. Acidez titulable en el tiempo para un suero fermentado y salado con NaCl.

Conclusiones

En este trabajo se demostró que es posible separar los ácidos del suero lácteo fermentado mediante la electrodiálisis utilizando un piloto modelo CH-0 de Asahi Glass. Existe un efecto importante de las sales en la separación de los ácidos (principalmente ácido láctico) y para obtener éstos ácidos, es necesario desalar el suero fermentado primero, para luego proceder a desacidificarlo, o utilizar sueros con bajo contenido de sales. Los resultados indican que es posible desacidificar el suero en un alto porcentaje, hasta un 78% y se puede desalar hasta alrededor de un 90%.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración del CDCHT de la Universidad de los Andes por su apoyo constante al Laboratorio de Mezclado, Separación y Síntesis Industrial y el aporte financiero del FONACIT a través de los proyectos S1- 2000000812 y F-2000001585. También se agradece a los árbitros quienes contribuyeron con sus observaciones a mejorar la calidad del manuscrito.

Referencias Bibliográficas

1. Avila, R., Cárdenas, A., Medina, A., "Tratamiento del lactosuero utilizando la

- técnica de electrodiálisis”, *Interciencia*, Vol. 25, No 2 (2000) 80-84.
2. Strathmann, H., “Electrodialysis”, En W Ho y K Sirkar, (ed) *Membrane Handbook*, Van Nostrand-Reinhold, Nueva York (1992) 217-262.
 3. Asahi Glass Co., “Demineralisation and purification of organic substances by electro-dialysis”, Tokyo (1993) 10-11.
 4. Novelect, “Applications innovantes des techniques membranaires dans l’industrie”, *Reseau Novelect*, Paris (1993) 42-49.
 5. Raucourt, A., Girard, D., Prigent, Y., Boyaval, P., “Lactose continuous fermentation with cells recycled by ultrafiltration and lactate separation by electro-dialysis: model identification”, *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 30 (1989) 528-534.
 6. Min-Tian, G., Koide, M., Gotou, R., Takanashi, H., Hirata, M., Hano, T., “Development of continuous electro-dialysis fermentation system for production of lactic acid by *Lactobacillus rhamnosus*”, *Process Biochemistry*, Vol. 40 (2005) 1033-1036.
 7. Lee, K., “A media design program for lactic acid production coupled with extraction by electro-dialysis”, *Bioresource Technology*, Vol. 96, No 13 (2005) 1505-1510.
 8. Yen, Y., Cheyran, M., “Electrodialysis of model lactic acid solutions”, *Journal of Food Engineering*, Vol. 20 (1993) 267-282.
 9. Nomura, Y., Iwahara, M., Hongo, M., “Lactic acid production by electro-dialysis fermentation using immobilized growing cells”, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 30 (1987) 788-793.
 10. Boniardi, N., Rota, R., Nano, G., Mazza, B., “Lactic acid production by electro-dialysis. Part I: Experimental tests”, *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 27 (1997) 125-133.
 11. Lee, E., Moon, S., Chang, Y., Yoo, I., Chang, H., “Lactic acid recovery using two-stage electro-dialysis and its modeling”, *Journal of Membrane Science*, Vol. 145 (1998) 53-66.
 12. Novalic, S., Jagschits, F., Okwor, J., Kulbe, K., “Behaviour of citric acid during electro-dialysis”, *Journal of Membrane Science*, Vol. 108 (1995) 201-205.
 13. Luo, G., Pan, S., Liu, J., “Use of the electro-dialysis process to concentrate a formic acid solution”, *Desalination*, Vol. 150 (2002) 227-234.
 14. Vera, E., Ruales, J., Dornier, M., Sandeaux, J., Persin, F., Pourcelly, G., Vaillant, F., Reynes, M., “Comparison of different methods for deacidification of clarified passion fruit juice”, *Journal of Food Engineering*, Vol. 59 (2003) 361-367.
 15. Andrés, L., Pérez, A., Alvarez, R., Coca, J., “Polarización de concentración en los procesos con membranas y (III) aplicación a la electrodiálisis”, *Ingeniería Química*, Enero (1992) 241-245.
 16. Boscán, L., “Manual de Prácticas de Laboratorio de Industrias Lácteas”, Universidad Simón Bolívar, Departamento de Biotecnología, Caracas (1978) 1-275.
 17. Cowan, D., Brown, J., “Effect of turbulence on limiting current in electro-dialysis cells”, *Ind. Eng. Chem.*, Vol. 51, No 12 (1959) 1445-1448.

Recibido el 31 de Octubre de 2006

En forma revisada el 23 de Febrero de 2007