

RECUPERACIÓN DE ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES POR ELECTRODIÁLISIS DE UN LICOR DE FERMENTACIÓN ANAEROBIA DE DESECHOS ORGÁNICOS SIMULADO

(Volatile fatty acids recovery by electrodialysis from a simulated anaerobic fermentation broth)

AYMER MATURANA CÓRDOBA

División ambiental, Ig IHM S.A. Director técnico, ingeniero químico, Universidad de América. Magíster en ingeniería ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia, 3526911 ext. 643, Cel.: 3153112982. Fax.: 3526936.

E-mail: aymermaturana@lycos.com

Fecha de recepción: 23 de abril de 2004

Fecha de aprobación: 21 de junio de 2004

RESUMEN

Se diseñó, construyó y operó una unidad de electrodiálisis para estudiar experimentalmente la recuperación como ácido acético del acetato producido durante la digestión anaerobia de desechos orgánicos, usando soluciones acuosas de acetato de sodio a diferentes concentraciones (5 g/l, 15 g/l y 30 g/l) para simular el licor de fermentación anaerobia. La electrodiálisis se llevó a cabo aplicando 8 diferentes voltajes a la unidad y monitoreando periódicamente el comportamiento de las variables principales del proceso. La tasa máxima de producción de ácido acético lograda fue de 1674 mg/l y se encontró que esta fue proporcional al voltaje aplicado, caudal de licor de fermentación alimentado a la unidad y a la densidad de corriente utilizada. El ácido acético se recuperó en agua destilada y adicionalmente en una solución acuosa de etanol. La electrodiálisis resultó ser una alternativa técnicamente viable en principio, para la producción de ácidos grasos volátiles, pues los resultados obtenidos demuestran que es posible hacerlo con relativa facilidad.

SUMMARY

It was designed and built an electrodialysis unit to study the recovery like acetic acid of the acetate taken place during the anaerobic digestion of organic waste experimentally, using watery solutions of acetate of sodium to different concentrations (5 g/l, 15 g/l and 30 g/l) to simulate the liquor of anaerobic fermentation. The electrodialysis was carried out applying 8 different voltages periodically to the unit and monitoring the behavior of the main variables of the process. The maximum rate of achieved production of acetic acid was of 1674 mg/l and it was found that this went proportional to the applied voltage, flow of liquor of fermentation fed to the unit and the density of used current. The acetic acid was recovered in distilled water and additionally in a watery solution of Ethanol and it was rehearsed with success the esterification of this last mixture, being able to produce ethyl Acetate. The electrodialysis turned out to be a technically competitive

alternative in principle, for the production of volatile fatty acids; because the obtained results demonstrate that it is possible to make it with relative easiness.

Palabras clave: electrodiálisis, ácidos grasos volátiles, ácido acético, acetato, fermentación, digestión anaerobia, membranas (Electrodialysis, volatile fatty Acids, Acetic Acid, Acetate, Fermentation, Anaerobic Digestión, Membranes)

I. INTRODUCCIÓN

Los ácidos grasos volátiles especialmente el ácido acético, son sustancias químicas muy importantes en la síntesis de muchos productos químicos ampliamente usados a nivel industrial, tales como el acetato de vinilo, el cual es básico para la fabricación del PVC, el acetato de celulosa usado en la industrial textil y plástica, el ácido tereftálico también empleado en la fabricación de plásticos ampliamente utilizados y todos los otros ésteres derivados de los ácidos grasos volátiles, los cuales se emplean como disolventes, perfumes, saborizantes o conservantes, por tan sólo mencionar algunas de sus aplicaciones. La mayoría de los ácidos grasos volátiles para uso industrial que se producen en el mundo, son obtenidos como derivados del petróleo, a pesar de que se conocen suficientemente los procesos de producción por fermentación y es también sabido que de la degradación anaerobia de los desechos orgánicos, resultan estos ácidos como subproductos. Recientemente se ha retomado la fermentación como una alternativa de producción importante de ácidos grasos volátiles, resultando en varios estudios que han logrado importantes avances en la búsqueda de algunas mejoras que hagan más eficientes los antiguos procesos de producción por fermentación.

En todos estos estudios, uno de los principales problemas por solucionar ha

sido la recuperación o aislamiento de los ácidos del licor que los contiene, de tal forma que puedan ser aprovechados en las mismas aplicaciones que los obtenidos convencionalmente. En este proceso de búsqueda de la solución adecuada a este problema, se han hecho ensayos con varios métodos de separación conocidos. Quizás el primero en ser utilizado fue la destilación, pues se usó como método de identificación de los ácidos grasos volátiles de acuerdo con la tasa de evaporación que cada uno presenta (Olmsted W., 1929).

La extracción líquido-líquido también ha sido probada como método de recuperación de ácidos grasos volátiles; recientemente se hicieron estudios de recuperación de ácidos grasos volátiles por extracción con una mezcla solvente de queroseno y tri-n-octilfosfina a partir de licores de fermentación de restos de cereales y desperdicios del procesamiento de leche, logrando un porcentaje de recuperación significativo (Mostafa, N.A., 1999).

El experimento más cercano al desarrollado en este estudio, fue el realizado para mejorar la producción de ácido acético por oxidación del etanol mediante un proceso de fermentación. En este experimento se empleó la electrodiálisis para minimizar el efecto inhibitorio del ácido acético acumulado, sobre las bacterias *acetobacter aceti*, *microorganismos* encargados de hacer que se lleve a cabo la fermentación. Gracias a la electrodiálisis se logró

remover periódicamente ante una indicación de pH, el ácido acético que se iba produciendo, evitando así la inhibición de las bacterias e incrementando en 1.35 veces la tasa de producción de ácido con respecto al proceso normalmente desarrollado (Nomura Y., 1987).

Otra investigación optó por recuperar la mezcla de todos los ácidos grasos volátiles formados durante la fermentación anaerobia, en lugar de aislarlos individualmente. Al reactor en donde se llevó a cabo la digestión se le acopló una unidad de microfiltración, la cual filtró el licor de fermentación y retuvo la biomasa; posteriormente este licor se esterificó con metanol, produciendo de esta forma los metil esteres correspondientes, los cuales se ensayaron como mejoradores del octanaje de gasolinas (D' addario, E., 1993).

El objetivo del presente estudio fue explorar experimentalmente la posibilidad de recuperación de ácido acético por la electrodiálisis del licor de fermentación anaerobia de desechos orgánicos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Licor de fermentación: para simular el licor de fermentación de un digestor anaerobio, se emplearon soluciones de acetato de sodio anhidro de diferentes concentraciones (5g/l, 15 g/l y 30 g/l) ajustadas a un pH de entre 6.3 y 6.7, por considerar que el acetato predomina sobre las demás especies en el licor de fermentación a un pH superior a 6 unidades. A este pH las especies diferentes del acetato, se considera que están presentes en concentraciones de nivel despreciable; sin embargo, su presencia no interfiere con el proceso de electrodiálisis; de esta forma, el licor

aquí simulado no se aleja considerablemente de la realidad.

A. Unidad experimental de electrodiálisis y equipo auxiliar: la electrodiálisis se llevó a cabo en una unidad diseñada y construida por el autor en el centro de investigación en ingeniería ambiental (CIIA) de la Universidad de los Andes, y sus especificaciones se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de la unidad de electrodiálisis desarrollada.

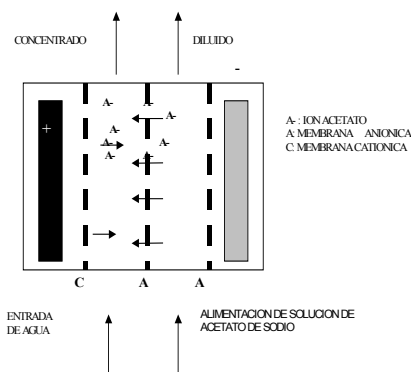
MÓDULO	
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	ACRÍLICO
VOLUMEN TOTAL	1420.65 cm ³
VOLUMEN DE TRABAJO	968.30 cm ³
COMPARTIMIENTOS	4
TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERACIÓN	80 ° C
MEMBRANAS DE INTERCAMBIO IÓNICO	
MEMBRANA CATIÓNICA	MC-3470
	SYBRON
MEMBRANA ANIÓNICA	MC-3475
	SYBRON
ÁREA EFECTIVA DE TRANSFERENCIA	159.96 cm ²
SEPARACIÓN MEMBRANAS	NOMINAL ENTRE 9 mm
SEPARACIÓN OPERACIÓN	PROMEDIO DURANTE 1 mm
ELECTRODOS	
ÁNODO	ACERO INOXIDABLE
	316, 45.00 cm ²

CÁTODO

GRAFITO, 39.60
cm²

La unidad posee cuatro compartimientos, uno para el ánodo, otro para el cátodo, uno más para el compartimiento de concentración y otro para el de dilución. La unidad se construyó utilizando la configuración de membranas de intercambio iónico mostrada en la figura uno; las membranas fueron fabricadas por Sybron Chemicals Inc., y sus referencias correspondientes se muestran en la Tabla uno.

De acuerdo con la configuración mostrada en la figura uno, los aniones (iones CH_3COO^-) contenidos en el licor de fermentación, penetran la membrana aniónica y pasan del compartimiento de dilución al de concentración, pero no pueden penetrar la membrana catiónica, de tal forma que se quedan "atrapados" en el compartimiento de concentración, en donde ocurre la reacción de producción del ácido acético gracias a los iones hidronio,



presentes en el agua destilada circulante por el compartimiento de concentración. La ecuación de la reacción es:

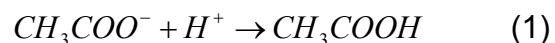


Figura 1. Configuración de las membranas

El licor de fermentación (500 ml. de solución de acetato de sodio) y el fluido de concentración (500 ml. de agua destilada), se hicieron circular continuamente por el compartimiento de dilución y el de concentración respectivamente a tres tasas diferentes (2.2 l/h, 4.7l/h y 8.2l/h); se utilizó un anolito (500 ml. de H_2SO_4 0.1 N) y un catolito (500 ml. de NaOH 0.1 N), los cuales circularon siempre a una tasa de 2.2 l/h. Para hacer circular los fluidos a través de los cuatro compartimientos de la unidad, se usaron bombas peristálticas Master flex, fabricadas por Cole-Parmer instruments Co.; la energía para el proceso estuvo suministrada por una fuente de corriente directa marca Maas, modelo KNT-500, capaz de suministrar ocho voltajes diferentes (1.5, 3, 4.5, 6, 7.5, 9, 12 y 15 voltios). El pH y la intensidad de corriente fueron monitoreados usando un potenciómetro portátil marca Handylab, y un multímetro digital marca Fluke modelo 83 respectivamente; en la figura dos se muestra el esquema de flujo con que operó la unidad de electrodiálisis.

La concentración de ácido acético fue establecida por titulación con NaOH 0.02N, en un titulador automático Metrohm 719S, acoplado a un medidor de pH Orion Research 720.

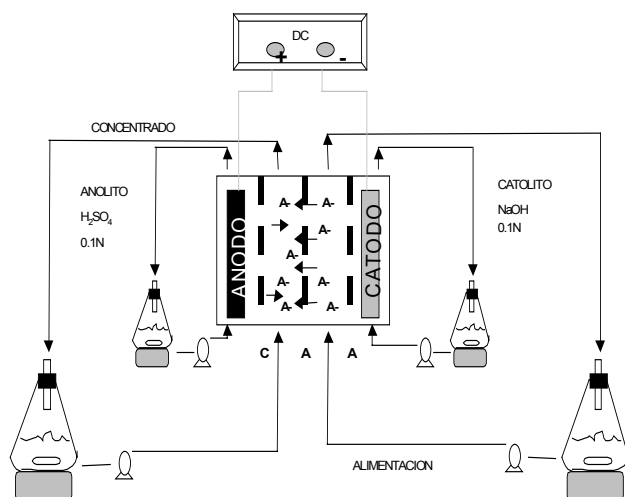


Figura 2. La unidad de electrodiálisis en funcionamiento.

El experimento de esterificación se desarrolló recuperando el ácido acético en solución acuosa de etanol a 50% en volumen, en lugar de hacerlo en agua destilada. A la mezcla agua-etanol-ácido acético se le agregó un mililitro de ácido sulfúrico concentrado y se llevó a un equipo de destilación (Rotavapor Heidolph WB 2000), en donde se destiló a 79 °C durante una hora. La identificación del acetato de etilo producido se hizo empleando un equipo de cromatografía líquida (Hewlett-Packard series II). Este sin duda será un aspecto en el que habrá que adentrarse con mayor profundidad en una investigación futura.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura tres muestra el comportamiento general presentado por el pH en cada uno de los compartimientos. Este comportamiento se presentó en todos los voltajes aplicados, concentraciones y tasas de circulación de la solución de acetato de sodio alimentada a la unidad. Esto permite afirmar en principio que la evolución del pH y con esto las reacciones que se dan en los electrodos, y las que se puedan dar en

los compartimentos de dilución y concentración, no son esenciales en el proceso de electrodiálisis.

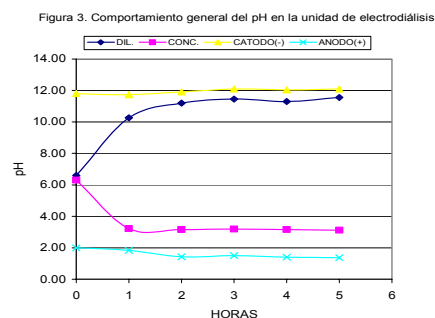
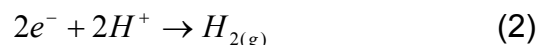


Figura 3. Comportamiento general del pH en la unidad de electrodiálisis

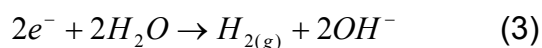
Figura 3. Comportamiento general del pH en la unidad de electrodiálisis.

El comportamiento del pH en la unidad de electrodiálisis se caracterizó por un aumento súbito (en promedio de 4 unidades) en el compartimento de dilución, por una disminución también súbita (de 3 unidades aproximadamente) en el compartimento de concentración, y por un comportamiento estable en los compartimentos de los electrodos.

El descenso de pH que registró siempre el compartimento de concentración fue debido a la producción de ácido acético luego de la transferencia de iones acetato; por otro lado, las reacciones que se dieron en los electrodos hicieron que el pH en sus compartimentos se mantuviera básicamente constante. En el cátodo se da la reducción del hidrógeno por acción de la corriente eléctrica (Kedem, O., 1978), mediante la reacción:



Esta reacción realmente es parte de la reacción global de producción de hidrógeno:

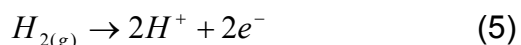


la cual se da por combinación de la ecuación (2) con la ecuación de desplazamiento del equilibrio del agua, ecuación (4) (Russell, J.B., 1991).



Como lo muestra la ecuación (3) hay una producción neta de iones oxihidrido (OH^-) los cuales causan pequeños incrementos de pH en el compartimiento catódico, que de por sí tiene un carácter básico fuerte, debido al hidróxido de sodio.

En el ánodo ocurre el proceso contrario, pues se da la reoxidación del hidrógeno, en la forma descrita en la ecuación (5) (Kedem, O., 1978).



Los iones hidronio que se producen contribuyen al carácter fuertemente ácido de la corriente anódica.

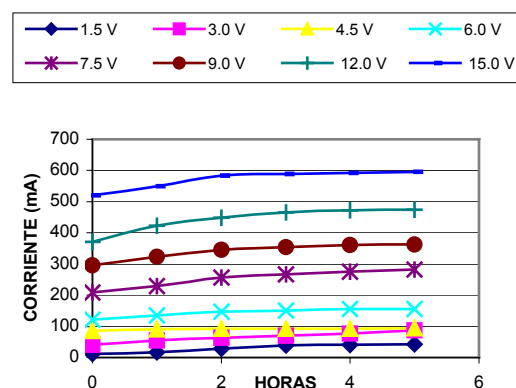
La Figura 4 muestra el comportamiento general en el tiempo, registrado por la intensidad de corriente en todos los ensayos. Este comportamiento indica que la corriente, para un voltaje y flujo dados aumenta en forma potencial, es decir, la relación entre la corriente y el tiempo de circulación es del tipo mostrado en la ecuación (6).

$$I = at^b \quad (6)$$

en donde a y b son constantes relacionadas con el voltaje aplicado, la concentración de alimentación y el caudal, puesto que se nota además (Figura 5) que I varía también entre cada caudal de alimentación utilizado en forma apreciable, esto es, de acuerdo con los resultados, cuanto mayor es el caudal de alimentación (y de producción en este caso), más elevada es la corriente necesaria. Esta relación también es del tipo potencial (AWWA, 1998), es decir:

$$I = cQ^d \quad (7)$$

En la ecuación (7) Q es el caudal de alimentación y c y d son constantes



también relacionadas con el voltaje, la resistencia y la concentración de la solución de acetato de sodio. d varía entre 0.5 y 0.6 (AWWA, 1998).

Figura 4. Variación de la intensidad de corriente

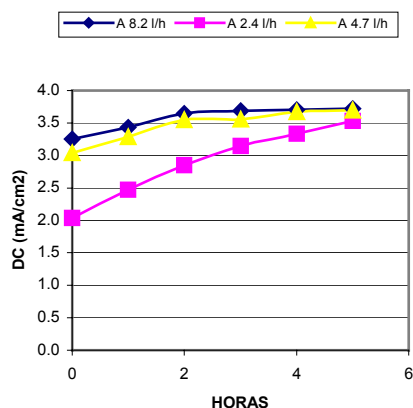
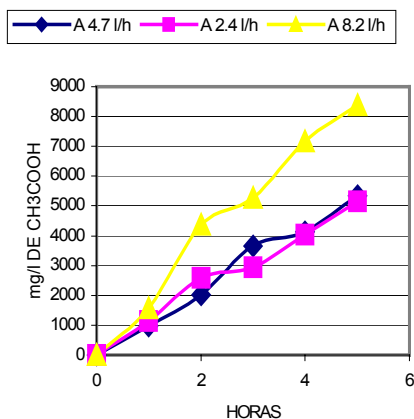


Figura 5. Variación de la densidad de corriente en los tres caudales de alimentación utilizados.

Para el proceso llevado a cabo durante este estudio, se varió en un amplio rango (entre 16 y 396) siendo mayor a mayor voltaje aplicado y, en uno no tan amplio (0.6 y 0.2), siendo mayor a menor voltaje.

La resistencia de la unidad se calculó a partir de I y V , y el resultado se dividió por el área total de la unidad (225.5 cm^2), para obtener de esta forma la resistencia por unidad de área de equipo. Esta resistencia disminuye con la corriente, lo cual se explica por el aumento progresivo de la conductividad de las soluciones, especialmente la de concentración, la cual pasa de ser agua destilada (que tiene una resistencia



relativamente alta) a ser solución de ácido acético.

La cantidad de ácido acético recuperado fue mayor a medida que se incrementó el voltaje para una concentración y caudal de alimentación dados. Es decir, la producción de ácido acético creció proporcionalmente a la corriente y al voltaje aplicado. Esta tendencia se observó dentro de todas las concentraciones y caudales de alimentación; sin embargo, hubo diferencias muy marcadas entre las producciones de ácido acético alcanzadas a una u otra concentración inicial de alimentación, y entre uno y otro caudal de alimentación utilizado (figura 6).

Figura 6. Recuperación de ácido acético en los tres caudales de alimentación utilizados.

Las diferencias son muy claras: las figuras 7 y 8 muestran cómo la tasa de producción de ácido acético se incrementa en 60% al pasar de una alimentación de 4.70 l/h a 8.20 l/h. Al pasar de 2.40 l/h a 4.70 l/h el incremento en la tasa de producción no es muy alto pero de todas formas esto confirma que existe una fuerte influencia de la transferencia de masa sobre el proceso de electrodiálisis, y que si se pusiesen elementos (tales como separadores con deflectores o sopladores de aire) que promovieran la turbulencia entre las membranas, la cantidad de ácido producido (o de acetato transferido) sería significativamente mayor.

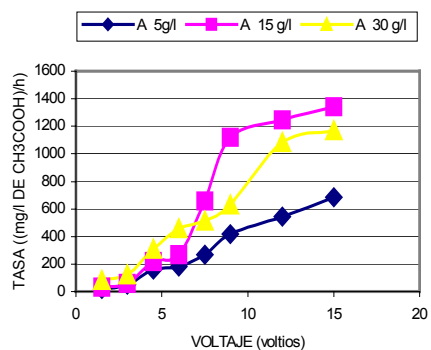


Figura 7. Tasas de recuperación logradas a las diferentes concentraciones del licor de fermentación.

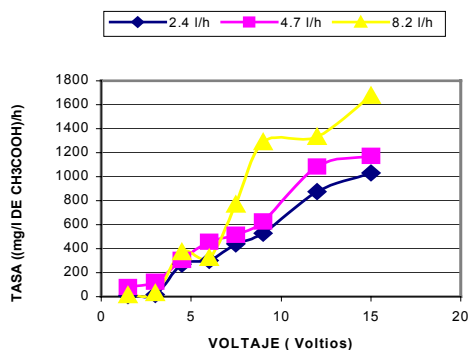


Figura 8. Tasas de recuperación logradas a los diferentes caudales de alimentación del licor de fermentación.

Igualmente es evidente (Figura 7) que a bajas concentraciones de la solución de alimentación, el porcentaje de acetato recuperado como ácido acético (o más bien la producción de ácido acético) es mayor. Nótese como a 30 g/l de acetato

de sodio en la solución de alimentación, la máxima recuperación alcanzó tan sólo 17%, mientras que a 15 g/l fue de 44% y a 5 g/l, de 68% aproximadamente.

Esto se debió a que las membranas de electrodiálisis no mantienen una alta permeselectividad a altas concentraciones de solución de alimentación, y en general la permeselectividad disminuye a medida que aumenta la concentración de la solución de alimentación; de aquí la baja eficiencia a altas concentraciones (Kedem O., 1978).

La permeselectividad es la más valiosa propiedad de las membranas de intercambio iónico, y es la capacidad para permitir el paso de ciertas especies iónicas mientras se evita el paso de otras especies (AWWA, 1998). Esto significa que mientras mayor fue la concentración de la alimentación, hubo mayor probabilidad de que pasaran otros iones diferentes al acetato y menor de que pasara acetato.

Por otro lado, la cantidad de ácido acético recuperado (Figura 5), se incrementó con la densidad de corriente DC (corriente/unidad de área de membrana), lo cual significa que mientras mayor sea la densidad de corriente aplicada, menor será el área de membrana necesaria para lograr un grado de separación determinado.

Tal como se realizó el experimento de electrodiálisis en el presente estudio, resulta ser un proceso de recirculación por tandas con mezcla, es decir, la concentración en los recipientes cambia continuamente. Si se define para la corriente de alimentación un factor de dilución fraccional f como:

$$f = \frac{Na - Np}{Na} \quad (8)$$

en donde Na es la normalidad inicial de la corriente de alimentación, Np es la normalidad final de la solución de ácido acético recuperado en eq/l.

Los equivalentes de iones acetato que salen del compartimento de dilución, deben ser iguales a los que recibe el compartimento de concentración en un instante dado, de tal forma que al igualar estas dos cantidades se tiene:

$$-VdNt = fNtdV \quad (9)$$

en donde V es el volumen del recipiente de la alimentación, Nt es la normalidad de la solución en el instante t.

Si se integra la ecuación anterior sobre un rango de dilución tal como entre Na y Ni y entre el volumen total y el volumen recirculado (Vr) se tiene:

$$-\int_{Na}^{Ni} \frac{1}{Nt} dNt = f \int_V^{Vr} \frac{1}{V} dV \quad (10)$$

$$-(\ln Ni - \ln Nt) = f(\ln Vr - \ln V)$$

De tal forma que:

$$\ln\left(\frac{Na}{Ni}\right) = f \ln\left(\frac{Vr}{V}\right) \quad (11)$$

En la ecuación (11), se puede notar que la relación Na/Ni representa la relación de dilución y Vr/V el número de veces que debe recircularse la solución para lograr este grado de dilución.

Dado que este es un proceso tipo batch, la potencia requerida para lograr que la unidad funcione, cambia con el tiempo durante todo el proceso, de tal forma que la potencia debe obtenerse, al igual

que en otros procesos batch mediante una función del tipo:

$$P_{total} = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta P d\theta \quad (12)$$

en donde θ es el tiempo de operación o circulación. Si se divide la ecuación (9) por $d\theta$ en ambos lados, se encuentra que:

$$-V \frac{dNt}{d\theta} = fNt \frac{dV}{d\theta} \quad (13)$$

Si se entendió bien el proceso de electrodiálisis, es fácil darse cuenta de que la variación del volumen en el tiempo en el recipiente de dilución o concentración, es igual a esa pequeña cantidad de iones acetato y el agua asociada a ellos, que logra ser transferido cada vez que el fluido (el diferencial de volumen) pasa por la membrana. Si a este caudal lo denominamos Qr, tendremos:

$$\frac{dV}{d\theta} = Qr \quad (14)$$

Sustituyendo la ecuación (14) en la ecuación (13) e integrando sobre un periodo de tiempo dado, requerido para diluir desde la concentración inicial Na a otra concentración como Nt, resulta:

$$-\int_{Na}^{Nt} \frac{dNt}{Nt} = \frac{Qr}{V} \int_0^\theta d\theta$$

Integrando:

$$-(\ln Nt - \ln Na) = \frac{Qr}{V} (\theta - 0) \quad \text{Luego,}$$

$$\ln\left(\frac{Na}{Nt}\right) = \frac{Qr\theta}{V}, \text{ por consiguiente:}$$

$$\frac{Na}{Nt} = e^{\frac{Qr\theta}{V}}$$

Resolviendo para Nt, finalmente se obtiene:

$$Nt = Na e^{-\frac{Qr\theta}{V}} \quad (15)$$

La ecuación (15) representa la concentración en la corriente de dilución en el tiempo θ .

La concentración en la corriente de producción, es decir, la concentración de ácido acético (Nc), si se desprecia el volumen de los iones que se transfieren, esta dada por:

$$Nc = \frac{(Na - Nt) \times (V_{\text{tanque-dilución}})}{V_{\text{tanque-concentración}}} \quad (16)$$

Pero si se tiene en cuenta que para este experimento se recircularon los mismos volúmenes de agua destilada y solución de acetato, Nc es:

$$Nc = Na - Nt \quad (17)$$

Sustituyendo la ecuación (15) en la ecuación (17), se encuentra que:

$$Nc = Na - Na e^{-\frac{Qr\theta}{V}} \quad (18)$$

que proporciona la concentración de ácido acético obtenida en un determinado tiempo de circulación. Para el experimento desarrollado Qr se calculó como:

$$Qr = \frac{\text{equivalentes transferidos / hora}}{\text{equivalentes iniciales / litro}} \quad (19)$$

En la Tabla 2 se muestran los valores de Nc calculados utilizando la ecuación

(18), con un Qr promedio de 0.0015 l/h calculado a partir de los datos experimentales para 30 g/l de solución de acetato de sodio alimentada a 4.7 l/h y a un voltaje de 1.5 voltios.

Tabla 2. Resultados obtenidos utilizando la ecuación 18.

HORAS	RESULTADOS (eq/l)	
	EXPERIMENTALES	POR LA ECUACIÓN (18)
1	0.0016	0.0021
2	0.0040	0.0044
3	0.0061	0.0066
4	0.0118	0.0087
5	0.0138	0.0109
6	0.0166	0.0131
7	0.0189	0.0152
8	0.0214	0.0174

Si se hace una gráfica que relacione el logaritmo natural de la concentración de ácido acético obtenida (se hizo para 5 g/l de acetato de sodio y 4.7 l/h) con el tiempo, se obtienen líneas que se aproximan a rectas (véase figura 9), de tal forma que la reacción de formación del ácido acético en la unidad de electrodiálisis desarrollada y operada en las condiciones descritas previamente, puede considerarse como de orden uno; de acuerdo con esto, se tiene:

$$\ln([CH_3COO^-]) = \ln([CH_3COO^-]_0) - kt \quad (20)$$

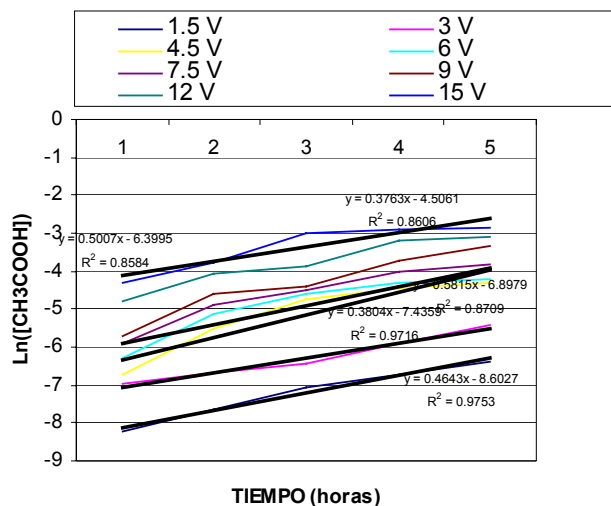


Figura 9. Determinación del orden de reacción

La ecuación (20) es la ecuación tipo para cada una de las rectas que aparecen en la Figura 9.

Si se resuelve la ecuación (20) para la concentración de acetato en el tiempo t , se obtiene:

$$[CH_3COO^-] = [CH_3COO^-]_0 e^{-kt} \quad (21)$$

que es una ecuación de la misma forma que la ecuación (18), para este estudio k varió entre 0.37 y 0.58 h^{-1} .

La tasa de recuperación de ácido acético en función del voltaje (figuras 7 y 8), para los diferentes caudales y concentraciones de solución de acetato de sodio utilizado, se ajustó mejor a una relación de tipo potencial, es decir, de la forma:

$$r = KV^a \quad (22)$$

en donde r es la tasa de recuperación, V es el voltaje y K y a son constantes. En la Tabla 3 se muestran los valores de estas constantes para todos los caudales y concentraciones de solución de acetato de sodio usadas.

Tabla 3. Constantes para la ecuación (22)

	A CAUDAL			A CONCENTRACIÓN		
	CONSTANTE			CONSTANTE		
	5 g/l	15 g/l	30 g/l	2.2 l/h	4.7 l/h	8.2 l/h
Coefficiente K	10.98	12.813	42.433	4.237	42.433	5.738
Exponente a	3	1.831	1.254	2.184	1.254	2.273
	1.583					

Adicionalmente, se graficó la tasa de recuperación en función del delta de concentración entre los dos compartimentos (figura 10), encontrándose que la primera disminuyó al aumentar el delta de concentración entre los dos compartimentos. Esto podría parecer extraño o ser indicio de un mal funcionamiento, si se tratara de un proceso de separación cuya fuerza motriz fuera la diferencia de concentración; pero afortunadamente se trata de electrodiálisis, y en este proceso, la fuerza motriz que promueve la separación no es propiamente una diferencia de concentración entre los dos compartimentos, sino una diferencia de potencial.

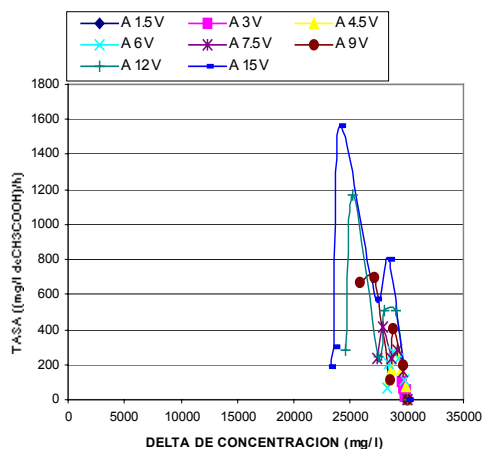


Figura 10. La tasa de recuperación de ácido acético en función del delta de concentración entre compartimentos.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio demuestran que la electrodiálisis como proceso de separación abre la posibilidad de recuperar para su aprovechamiento a escala industrial los ácidos grasos volátiles que se producen durante el proceso de digestión anaerobia de desechos orgánicos, lo cual es un aporte significativo, si se considera que provee una fuente de obtención alternativa al petróleo, el cual es mucho más costoso comparativamente con los desechos orgánicos (desperdicios de frutas, vegetales, cereales, etc.) y su precio y disponibilidad en el mercado mundial son altamente dependientes del acontecer político internacional.

Otro aporte importante que puede hacer la electrodiálisis aplicada a la digestión anaerobia, y que se vislumbra gracias a los resultados logrados por el presente estudio, consiste en que el acople de una unidad de electrodiálisis tal como la desarrollada para este trabajo, a un reactor anaerobio en

proceso de arranque, permitiría que este proceso se hiciera más fácilmente, dado que al remover continuamente los ácidos grasos volátiles que se van produciendo, se evitaría la inhibición de las bacterias y con ello la falla del reactor por acumulación de ácidos, así como también permitiría reducir la cuantiosa inversión de tiempo y dinero en la compra y posterior suministro de sustancias químicas acondicionadoras de pH.

V. REFERENCIAS

1. Mostafá, n.a. Production and recovery of volatile fatty acids from fermentation broth, Energy conversion & Management, 40 (1999) 1543-1553.
2. Awwa., et-al. Tratamiento del agua por procesos de membrana: Principios, procesos y aplicaciones, Mc Graw-Hill, Madrid 1998.
3. Nomura, y., et-al. Acetic acid production by an electrodiálisis fermentation method with a computerized control system, Applied and environmental microbiology, 54(1988) 137-142.
4. Mintz m.s. Electrodiálisis: principles of process design, Industrial and engineering chemistry, 55(1963) 18-28.
5. Kedem, o., et-al. A simple electrodiálisis stack, Desalination 24(1978)313-319.
6. Kedem, o., et-al. Sealed cell electrodiálisis, desalination, 46(1983)291-299.

7. Braun, r., et-al. Anaerobic digestion of agroindustrial byproducts and wastes, Workshop on anaerobic conversion for environmental protection, sanitation and re-use of residues, Gent, Belgium, 1997.
8. Olmsted, w., et-al. Steam distillation of the lower volatile fatty acids from a saturated salt solution, Journal of biological chemistry 85(1929-1930)109-114.
9. Olmsted, w., et-al. A method for the rapid distillation of the lower volatile fatty acids from stools, Journal of biological chemistry 85(1929-1930)115-126.