



USO DE CURVAS DE POLARIZACIÓN PARA ENTENDER EL TRANSPORTE DE IONES A TRAVÉS DE UNA MEMBRANA DE INTERCAMBIO IÓNICO

Luz María Torres Rodríguez¹, Antonio Montes Rojas, Guadalupe Vázquez Rodríguez, Estefanía Pérez Díaz

Resumen

La electrodiálisis es un proceso electroquímico de separación muy usado en la industria y en remoción de contaminantes presentes en agua, por lo que es muy importante entender los fenómenos asociados a este proceso. Sin embargo, se han publicado pocos estudios enfocados a facilitar su comprensión. Por estas razones, en este trabajo se propone emplear curvas de polarización para estudiar cómo afecta al transporte de un ion a través de una membrana de intercambio iónico, la concentración del ion y su carga; y la incrustación de sales insolubles en la membrana.

Palabras clave

electrodiálisis, membranas de intercambio iónico, curvas de polarización

Use of polarization curves for understanding ion transport through an ion exchange membranes

Abstract

Electrodialysis is an electrochemical separation process very used in industry and elimination of pollutants contained in water, so is very important to understand phenomena associated to this process. However, there are only few works that have focused on proposing methods to facilitate your understanding. For these reasons, in this work is proposed using polarization curves to study effect of ion concentration, charge of ion and scaling of membrane in ionic transport through an exchange ion membrane.

Keywords

electrodialysis, ion exchange membranes, polarization curves

¹ Químico por la Facultad de Ciencias Químicas de la UASLP. Maestría en Química por la UAM-Iztapalapa y Doctorado en Química por la Universidad Joseph Fourier. Actualmente es Profesor-Investigador de la Facultad de Ciencias Químicas de la UASLP, en donde imparte cursos de Fisicoquímica y Electroquímica. Sus trabajos de investigación están enfocados al desarrollo de electrodos modificados para la cuantificación de compuestos orgánicos. También, estudia la modificación y elaboración de membranas de intercambio iónico comercial con Polímeros Conductores Electrónicos. Tiene nombramiento SNI nivel 1 (área 2).

Introducción

La electrodiálisis es un proceso electroquímico de separación en el que los iones disueltos en una fase líquida, agua u otro líquido, se mueven por influencia de un campo eléctrico y preferentemente atraviesan una membrana de intercambio iónico (MII). La electrodiálisis es ampliamente utilizadas en dominios diversos, como tratamiento de aguas residuales (Lillo *et al.*, 2011), separaciones de un ion de interés de una mezcla (Ibáñez *et al.*, 2007), desalinización de agua (Dévora-Isiordia *et al.*, 2013), tratamiento de desechos lácteos (Ávila *et al.*, 2000), producción de ácidos orgánicos (Huang *et al.*, 2007) y tratamiento de vinos (Corti y Paladino, 2016). Para emplear la electrodiálisis y obtener los resultados deseados se requiere conocer y entender los diferentes fenómenos que ocurren en este proceso. Sin embargo, en la literatura se encuentran pocos trabajos que han abordado el tema desde un punto de vista didáctico (Montes- Rojas y Cerda-Alvárez, 2009; Schufle, 1961; García-García *et al.*, 2000, Kendall y Gebauer-Fuelnegg, 1931). Hasta el momento, las curvas de polarización o curvas I-E no han sido utilizadas como herramienta para facilitar la comprensión de los fenómenos que ocurren cuando un ión atraviesa una MII, a pesar de que su forma es dependiente de éstos. En este trabajo se propone la realización de curvas de polarización para evidenciar cómo influyen diferentes factores en el transporte de iones a través de una MII.

Antecedentes

Las propiedades selectivas de las MII están asociadas a los tres tipos de especies cargadas que pueden encontrarse en su seno (Figura 1): (a) cargas fijas, que se encuentran inmovilizadas en la membrana; (b) contraiones, especies cargadas móviles que contrarrestan la carga de las fijas; y (c) coiones, éstos son especies móviles cuya carga es del mismo signo que la de las fijas.

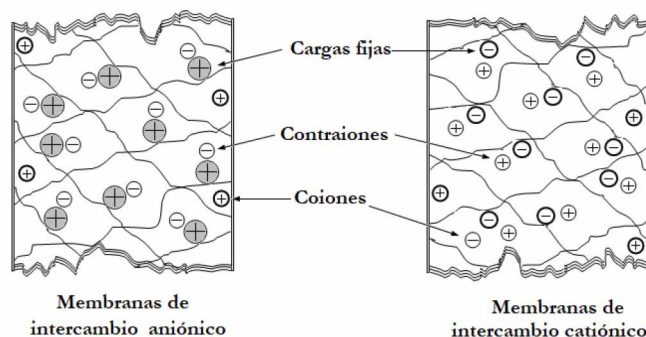


Figura 1. Diagrama esquemático de las cargas de una MII.

Durante la electrodiálisis, por medio de dos electrodos se genera un campo eléctrico el cual actúa como una fuerza impulsora que mueve a los iones en la disolución y a través de la MII. Los aniones se moverán hacia el ánodo y los cationes al cátodo. El movimiento de los iones a través del dispositivo estará condicionado por las MII, debido a que se desarrollan interacciones entre los iones presentes en la solución y sus cargas fijas (Figura 2). Cuando éstas son negativas, se denominan membrana de intercambio catiónico (MIC), ya que solamente pueden ser atravesadas por cationes, porque repelen electrostáticamente a los aniones (Figura 2a). Mientras que si la membrana, denominada en este caso de intercambio

aniónico (MIA), tiene cargas fijas positivas, entonces son atravesadas por aniones y rechazan a los cationes (Figura 2b). De esta forma, se produce una separación selectiva de las especies de acuerdo a su carga. Un arreglo con más de un tipo de MII (Figura 2c y 2d) permite obtener una solución concentrada y otra diluida en un ion particular. Adicionalmente, en este último acomodo se impide que los compuestos formados en los electrodos lleguen a los compartimentos centrales.

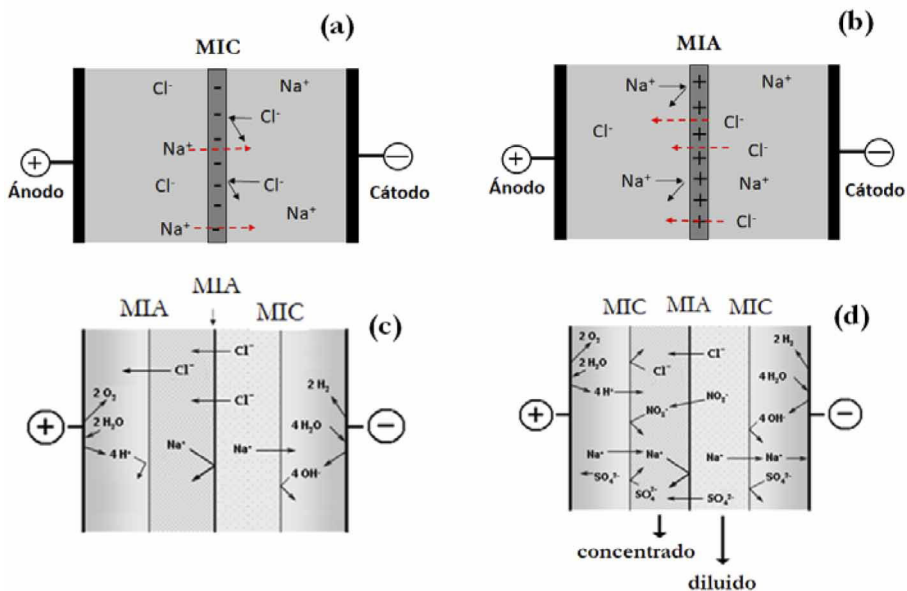
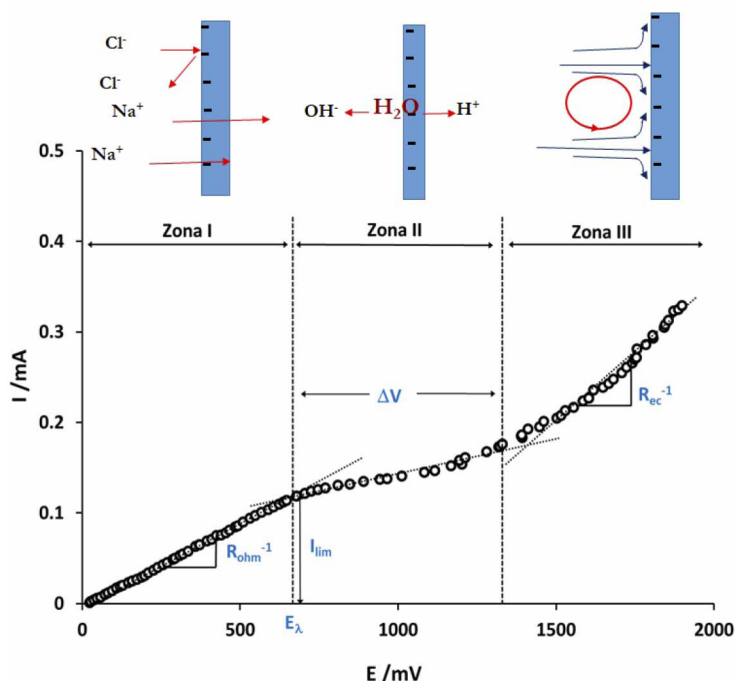


Figura 2. Diagrama esquemático del paso de iones a través de una celda de electrodiálisis empleando una: (a) MIC, (b) MIA, (c) y (d) ejemplos de celdas que emplean MIC y MIA.

Figura 3. Forma típica de una curva de polarización para una MIC. En la parte superior se ilustran los fenómenos que predominan en cada etapa.



Un concepto esencial asociado a una MII es sin duda su selectividad, la cual se puede definir como la capacidad que posee una MII de discriminar a ciertas especies. Ésta se puede cuantificar a través del número de transporte de un ion en la MII (t_m), que es la

fracción de corriente, del total que atraviesa a una solución, asociada a cada ión. Si se utiliza al contrario para cuantificar esta cantidad, debido a que es el único que atraviesa la MII, se puede definir la selectividad ideal de la membrana con un t_m cercano a la unidad. Si otros iones atraviesan la MII, contribuyen al transporte de carga y por consecuencia a la disminución de t_m .

Por otra parte, las curvas I-V, son representaciones gráficas entre la corriente que atraviesa a la membrana en función de la diferencia de potencial que se desarrolla entre sus dos caras. Una curva de polarización tiene una forma típica (Figura 3), en la que se distinguen tres secciones o zonas a las cuales se asocian a fenómenos específicos (Scarazzato *et al.*, 2015).

La zona I o zona óhmica, se caracteriza por una relación lineal entre la corriente y el potencial, es decir se cumple la ley de Ohm. Esto se debe a que el incremento de la fuerza impulsora (el potencial), incrementa el flujo de especies cargadas (corriente) que atraviesan la MII. La zona II o de pseudomeseta se reconoce porque la corriente es prácticamente independiente del potencial, debido a que en las cercanías de la MII los iones se agotan en un momento dado y al no existir portadores de carga la resistencia aumenta notablemente. Sin embargo, la corriente incrementa ligeramente con el potencial, debido a que la ausencia de portadores de carga, es compensada por los iones formados por efectos acoplados como el desdoblamiento del agua (Formación de H^+ y OH^-), la convección gravitacional y la electroconvección (Mikhaylin *et al.*, 2016). En la zona III o región de electroconvección, la corriente y el potencial nuevamente adoptan una relación lineal. En efecto, los iones atraviesan la membrana a través de los poros, no solo perpendicularmente a la superficie de la membrana, sino que también tangencialmente; dado que la superficie de la membrana es rugosa y heterogéneas, las cargas se mueven en remolinos que llevan a una destrucción de la capa de difusión (Pis'menskaya *et al.*, 2012) y el reinicio de la difusión.

De las curvas de polarización se obtienen parámetros que dan información sobre el transporte iónico a través de la MII (Figura 3):

a) Corriente límite (I_{lim}). Este parámetro permite fijar las condiciones de operación de la electrodiálisis y una forma de obtener su valor es de la intersección de las líneas tangentes de los segmentos de la curva en la zona I y II. La relación de la I_{lim} con otros parámetros se describe en la ecuación (Spiegler, 1971):

$$I_{lim} = \frac{zDFC_i^0 A}{\delta(t_m - t_s)} \quad (1)$$

Donde z es la carga del contraión, F es la constante de Faraday ($Cmol^{-1}$), D es el coeficiente de difusión (cm^2s^{-1}), A el área de la membrana (cm^2), C_i^0 la concentración del contraión en solución ($molcm^{-3}$), t_m y t_s son el número de transporte del contraión en la membrana y en la solución respectivamente, δ es el espesor de la capa de difusión (cm), como se observa en la Figura 4 corresponde a la longitud entre la MII y la solución, en la que la concentración del ion es distinta al resto de la solución. En efecto, durante la aplicación de un campo eléctrico en un lado de la MII, la especie disminuye porque atraviesa la MII, incrementándose la especie del lado opuesto. El valor de δ depende de si la solución está o no bajo agitación. De acuerdo con esta ecuación se deduce que I_{lim} depende de la naturaleza del ion (z , D , t_s) y su concentración (C_i^0), de las condiciones hidrodinámicas (δ), la selectividad (t_m) y el área de la membrana (A).

Como ya se mencionó, el valor de I_{lim} se usa para determinar el valor óptimo de corriente a aplicar durante la electrodiálisis, el cual se fija al 80 % del valor de I_{lim} , para evitar el efecto de reacciones secundarias como el desdoblamiento del agua sobre la separación selectiva del contraión. Asimismo, I_{lim} puede darnos información de la selectividad de diferentes membranas hacia un mismo ion. Cuando se estudian varias membranas en iguales condiciones, los parámetros de la ecuación 1 serán iguales para todas las membranas a excepción de t_m . Entre más grande sea t_m , mayor será la diferencia $t_m - t_i$ y menor la I_{lim} , por lo que entre menor sea I_{lim} , mayor será la selectividad de la membrana.

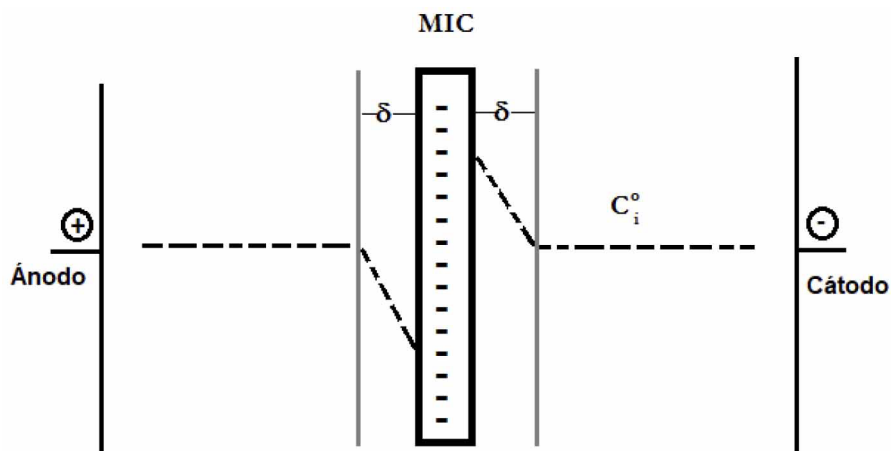


Figura 4. Representación del perfil de concentración de una especie que atraviesa una MIC en una celda de electrodiálisis. La línea punteada representa la concentración en el seno de la solución (C_i^o) y en la capa de difusión (δ).

b) Resistencia óhmica (R_{ohm}). Corresponde al inverso de la pendiente de la zona I. Es una medida de la resistencia al paso de corriente desde la membrana hacia la solución. La R_{ohm} corresponde a tres contribuciones: la resistencia de la membrana (R_m), de la capa de difusión (R_{cd}) y de la solución (R_s). Como la corriente sigue una sola dirección las resistencias se encuentran en serie y la R_{ohm} se obtiene de la suma algebraica de las tres contribuciones. Este valor permite comparar por ejemplo la R_m de MII diferentes, cuando se utiliza la misma solución.

c) Potencial de transición (E_λ). Es el potencial donde finaliza la zona I e inicia la zona II. Este valor es proporcional a la energía necesaria para agotar la especie en la cercanía de la interfaz membrana/solución. Por lo que se incrementa con la concentración y con la carga del contraión.

d) Amplitud de la meseta (ΔV). Este valor se obtiene de la diferencia de potenciales del punto donde inicia la zona III y donde termina la I. Esta magnitud se relaciona con el requerimiento energético para que el transporte de masa cambie de difusión a electroconvección (Choi *et al.*, 2001). Por lo que diferentes factores afectan su valor como: 1) la rugosidad de la membrana, en efecto, entre mayor sea el número de imperfecciones, menor será ΔV , ya que las turbulencias que originan la electroconvección se formaran con mayor facilidad.

2) La concentración de la especie iónica. Cuando ésta incrementa disminuye ΔV , debido a que aumentan las interacciones del ion con las zonas no conductoras de la MII y se favorece la electroconvección.

3) La carga y el tamaño del ion. A mayor carga y tamaño del ion solvatado, menor ΔV , debido a que a mayor tamaño del ion solvatado, mayor será el número de hidratación y la capacidad de mover moléculas de agua.

d) Resistencia de electroconvección (R_{ec}): Este parámetro se determina del inverso de la pendiente de la recta de la zona III. También es una medida de la facilidad con la que se produce la electroconvección. Una resistencia baja indica que hay muchas especies en las cercanías de la membrana y que la electroconvección es importante. Por lo que disminuye con las imperfecciones de la MII, concentración, carga y tamaño del ion.

f) R_{ec}/R_{ohm} : $\Delta R (R_{ec} - R_{ohm})$. Ambos parámetros comparan R_{ec} y R_{ohm} , una diferencia grande indica que se favorece la electroconvección, por lo que se consideran al igual que ΔV

inversamente proporcionales al requerimiento energético necesario para destruir la capa de difusión.

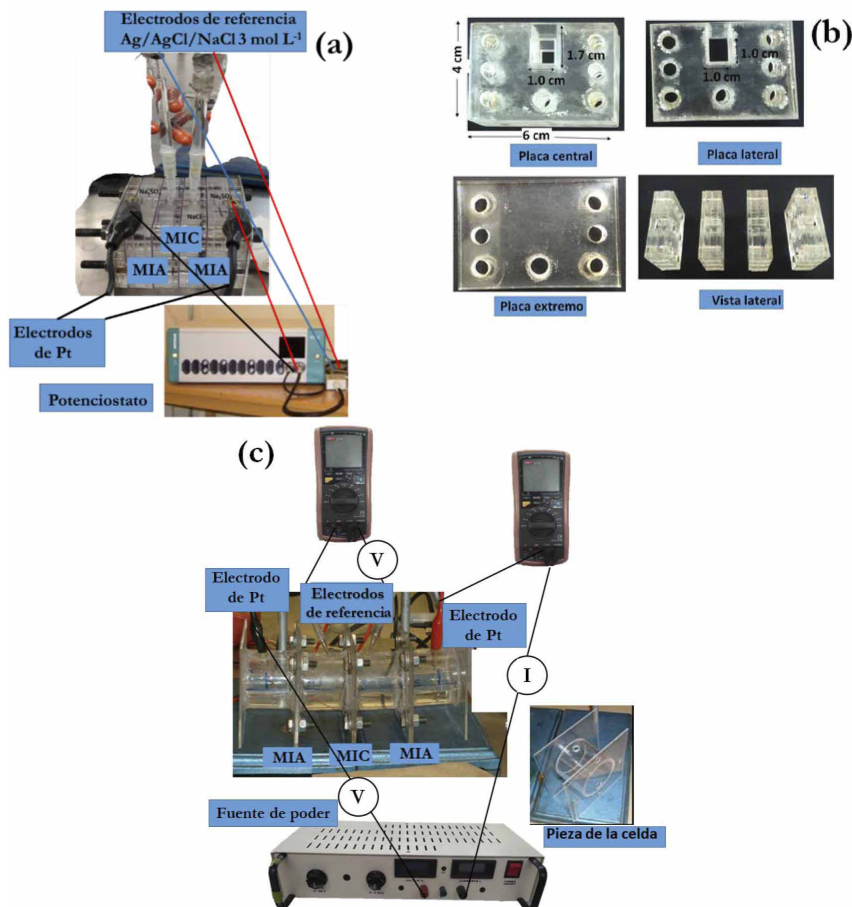
Parte experimental

Las MII fueron colocadas en la solución de trabajo durante una hora antes de obtener las curvas I-E. Éstas se pueden realizar de modo automatizado o manualmente. En este trabajo se realizaron de ambas maneras, en la primera se usó una celda de acrílico (Figura 5a), diseñada y elaborada en el laboratorio; formada por cuatro compartimentos (Figura 5b) separados por tres MII comerciales (ASTOM): dos catiónicas (CMX) y una aniónica (AFX) y ensambladas con tornillos. De acuerdo a las especificaciones del fabricante el espesor de la membrana CMX se encuentra entre 0.14 y 0.20 cm; mientras que la AFX tiene un grosor entre 0.13 y 0.18 cm. La MII de estudio (MIC) se colocó en el centro y las auxiliares (MIA) en los extremos. En los compartimentos adyacentes a la MIC se instalaron electrodos de referencia de Ag/AgCl/NaCl 3 mol L⁻¹. Éstos se colocaron en extensiones de vidrio con punta de agar preparado con solución de NaCl 3 mol L⁻¹. Estos electrodos tienen la finalidad de medir la diferencia de potencial, inducida por la diferencia de concentraciones en ambos lados de la MIC, la cual se debe a que en un lado de la membrana la concentración de iones disminuye debido a que éstos atraviesan la MIC, induciendo un incremento de la concentración de iones en el lado opuesto de la MIC. Para una óptima obtención de las curvas, las puntas de los capilares

deben colocarse lo más cercanas a la superficie de la MII, una frente a otra en un mismo punto. En los compartimentos laterales se colocaron dos placas de platino de iguales dimensiones. Los compartimentos centrales se llenaron con las soluciones de estudio, que fueron preparadas con agua desionizada (18 MΩcm). Para los compartimentos laterales se empleó una solución de Na₂SO₄ 1 M para evitar la formación de Cl₂. Las curvas I-E se elaboraron empleando un potencióstato/galvanostato Autolab, el cual impuso la corriente y midió el potencial automáticamente.

Para realizar las curvas I-E manualmente se empleó una celda formada por cuatro piezas, elaboradas a partir de tubos y placas de acrílico, cada uno de ellos tiene orificios para la MII, los electrodos y los tornillos. El acomodo de las MII, soluciones y electrodos fue análogo al realizado

Figura 5. Dispositivo experimental para la realización de curvas I-E empleando (a) un potencióstato-galvanostato, (b) piezas de la celda empleada. (c) Dispositivo experimental con fuente de poder.



con el potencióstato/galvanostato. Cada punto de la curva I-E se obtuvo aplicando con una fuente de poder una diferencia de potencial entre los electrodos de platino. Con un multímetro conectado en serie a las placas de platino se determinó la corriente; en tanto que la diferencia de potencial entre las dos caras de la membrana de estudio se midió con un multímetro conectado a los electrodos de referencia. Este procedimiento se repitió aumentando gradualmente el potencial hasta obtener los puntos necesarios para las curvas I-E. En ambos casos cada curva de polarización se realizó por triplicado. Cada curva de polarización se realiza en aproximadamente 10 minutos. El ensamble y llenado de la celda toma 15 minutos. Para cada replica, las soluciones fueron cambiadas, para esto la solución usada se extrajo de la celda succionando con pipetas a fin de que las MII permanecieran en la misma posición y el experimento fuera reproducible.

Resultados y discusiones

Primero se investigó el efecto de la carga del catión, por lo que se realizaron curvas de polarización empleando soluciones de NaCl, CaCl₂ y AlCl₃ a una misma concentración de catión. Las curvas obtenidas se presentan en la Figura 6a, todas tienen las tres regiones características de una curva I-E. Adicionalmente se observa que su forma es dependiente de la carga del ión, lo que muestra que este parámetro afecta el transporte del catión a través de la membrana. A fin de realizar un análisis más cuantitativo se obtuvieron los diferentes parámetros de las curvas de polarización y se agruparon en la Tabla 1. La I_{lim} se incrementa cuando aumenta la carga. Este efecto, puede predecirse de la ecuación 1, en donde se observa que la I_{lim} es directamente proporcional a la carga del ión. Esto se debe a que los iones multivalentes tienen una mayor carga, por lo que la carga transportada por unidad de tiempo, es decir la corriente, es mayor.

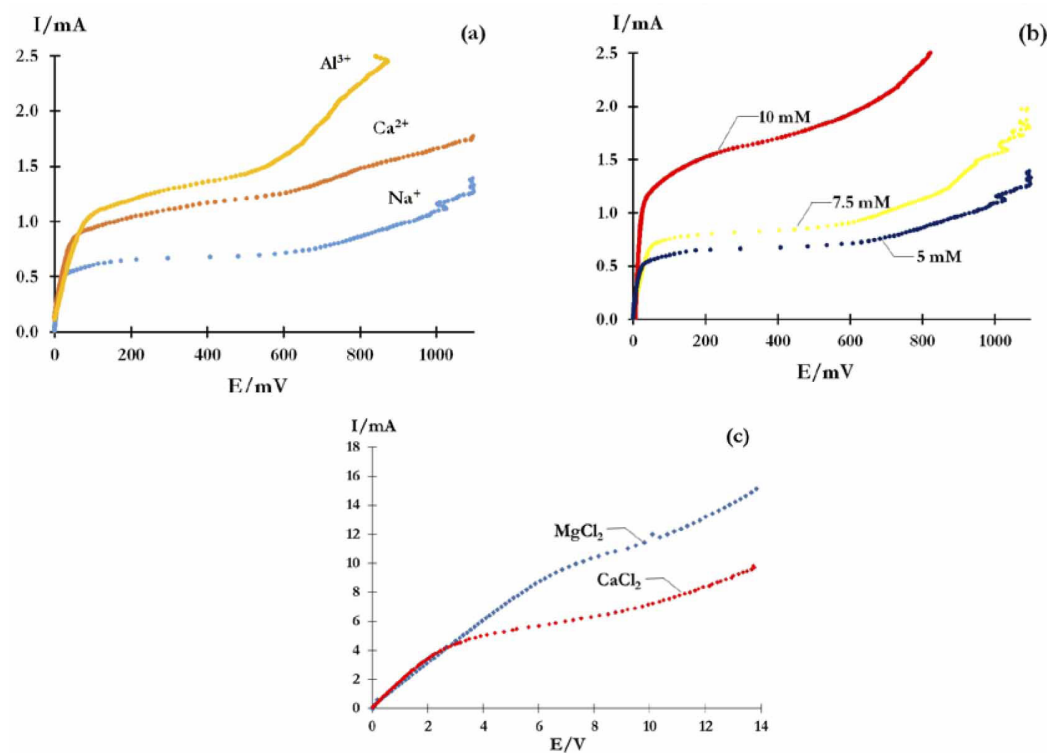


Figura 6. Curvas de polarización obtenidas con un potencióstato galvanostato, empleando una MII comercial CMX y soluciones: (a) 0.01 mol L⁻¹ de NaCl, CaCl₂ y AlCl₃, (b) NaCl a diferentes concentraciones. (c) Curvas I-E obtenidas con una fuente de poder, empleando una MII comercial CMX y soluciones de concentración 0.1 mol L⁻¹.

En cuanto a E_λ , se observa que se incrementa con la carga del ión. Este resultado indica que la dificultad para agotar la especie en la interfaz incrementa con la carga. Esto debido a que los iones multivalentes tienen mayor atracción electrostática hacia especies cargadas, por lo que atraen mayor cantidad de moléculas de agua y su esfera de hidratación es mayor desplazándose más lentamente que los iones univalentes (Hamani *et al.*, 2011). En lo que respecta a R_{ohm} , se observó que su valor incrementa con la carga, como se señaló R_{ohm} es la suma de tres contribuciones. Como la membrana es la misma R_m es la misma para todos los iones, y la concentración es la misma R_{cd} es igual para los tres iones, indicando que la diferencia es debida a R_s , la resistencia es mayor para los cationes multivalentes debido a que se desplaza más lentamente. También se observó que ΔV , ΔR y R_{ec}/R_o aumentaron el siguiente orden: $Al^{3+} < Ca^{2+} < Na^+$. Estos parámetros son inversamente proporcionales al requerimiento energético para destruir la capa de difusión, lo cual indica que es más difícil agotar la especie en la interfaz cuando los iones son multivalentes, debido a que están más hidratadas y se desplazan más lentamente que las univalentes.

Una vez analizado el efecto de la carga del catión en las curvas, se analizó el de la concentración, para esto se empleó el Na^+ , se observa que la forma de las curvas depende de la concentración (Figura 6b), lo que muestra que el transporte iónico en la MII cambia con la concentración. Los datos obtenidos de las curvas I-E, se agrupan también en la Tabla 1. La I_{lim} de Na^+ incrementa con la concentración tal como lo predice la ecuación 1, que indica que la I_{lim} es directamente proporcional a C_i^o e inversamente proporcional a δ , siendo el resto de parámetros de la ecuación constantes para un mismo ión, en consecuencia I_{lim} incrementa con la concentración. Esto se debe a que a medida que aumenta la concentración es necesario un mayor paso de corriente para agotar al ion en la interfaz membrana/solución. Por otro lado E_λ incrementa con la concentración, puesto que cuando incrementa la concentración se requiere más energía para agotar la especie en la interfaz membrana/solución. También se observó que para las soluciones 7.5 y 10 mM R_{ohm} disminuye cuando incrementa la concentración de los iones, dado que al incrementar la concentración se incrementa la cantidad de portadores de carga, disminuyendo la contribución de R_s . La solución 5 mM no siguió la tendencia, probablemente por algún detalle experimental. Finalmente se observó que R_{ec} , R_{ec}/R_{ohm} , ΔR y ΔV disminuyen cuando incrementa la concentración. Esto indica que cuando aumenta la concentración es más fácil que ocurra la electroconvección, dado que cuando aumenta la concentración se incrementa el contacto de los iones con las partes no conductoras de las membranas facilitando la electroconvección.

Efecto de la carga del catión (Figura 6a)							
I_{lim}/mA	R_{ohm}/Ω	R_{ec}/Ω	E_λ/mV	$\Delta V/mV$	R_{ec}/R_{ohm}	$\Delta R/\Omega$	
Na^+	0.53	35.0	925.9	35.95	570.1	26.5	890.9
Ca^{2+}	0.90	41.7	909.0	44.93	517.2	21.8	867.3
Al^{3+}	1.2	71.4	297.6	80	475.6	4.2	226.2
Efecto de la concentración de NaCl expresada en $mmolL^{-1}$ (Figura 6b)							
5	0.533	34.96	925.9	35.95	570.1	26.48	890.94
7.5	0.75	62.11	729.42	50	558.67	11.74	667.31
10	1	54.05	409.83	59	508.15	7.58	355.78

Tabla 1. Datos obtenidos a partir de las curvas de polarización de la Figura 6.

Finalmente se estudió el efecto del ensuciamiento de la membrana, para esto se trabajó con soluciones más concentradas (0.1 mol L^{-1}) de CaCl_2 y MgCl_2 , ya que estas sales ensucian la membrana, puesto que tienden a formar costras de hidróxidos en la superficie de la MII, las cuales catalizan el desdoblamiento del agua (Andreeva et al., 2017), aunque el MgCl_2 lo hace con mayor intensidad. Se observa que la I_{lim} de Mg^{2+} (8.5 mA) es casi el doble que la de Ca^{2+} (4.4 mA), contrario a lo esperado de la ecuación 1, que predice un valor similar, ya que las variables involucradas son muy similares. Esto se debe a que el hidróxido de magnesio formado en la superficie de la MII cataliza el desdoblamiento del agua, por lo que el incremento de I_{lim} , se debe a esta contribución que no es considerada en la ecuación 1. Adicionalmente se observa que las pendientes de Ca^{2+} y Mg^{2+} en la zona I son prácticamente iguales, lo que indica que R_{ohm} es muy similar para ambos cationes. En efecto, aunque se esperaría una resistencia más pequeña para Mg^{2+} que para Ca^{2+} debido a que en el caso de Mg^{2+} hay más iones en solución considerando los iones producidos por desdoblamiento del agua. Sin embargo, la resistencia global es la misma para ambos iones, ya que la R_m es más grande para Mg^{2+} que para Ca^{2+} debido a la costra formada de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ en la superficie de la MII razón por la cual se eliminan partes conductoras e incrementa la resistencia de la MII y la resistencia total.

Conclusiones

En este trabajo se muestra que las curvas de polarización evidencian, de manera experimental, cómo cambia el transporte de diferentes contraiones a través de una MII selectiva a los cationes con diferentes parámetros de la solución y de la MII, lo que facilita la comprensión de los procesos que toman lugar.

Agradecimientos

Guadalupe Vázquez Rodríguez agradece a CONACYT la beca otorgada (48994).

Conflicto de Intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Andreeva, M. A., Gil, V. V., Pismenskaya, N. D., Nikonenko, V. V., Dammak, L., Larchet, C., Grande, D., Kononenko, N. A. (2017). Effect of homogenization and hydrophobization of a cation-exchange membrane surface on its scaling in the presence of calcium and magnesium chlorides during electro dialysis. *Journal of Membrane Science*, 540, 183-191.
- Ávila, R. M., Cardenas, A., Medina, A.L. (2000). Tratamiento de lactosuero utilizando electrodiálisis. *Interciencia*, 25 (2), 80-84.
- Choi, J. H., Lee, H. J., Moon, S. H. (2001) Effects of electrolytes on the transport phenomena in a cation-exchange membrane. *Journal of Colloid and Interface Science*, 238, 188-195.
- Corti, S. V., Paladino, S. C. (2016) Estabilización tartárica de vinos: comparación entre electrodiálisis y frío por contacto. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad de Cuyo*. 48 (1), 225-238.

- Dévora-Isordia, G. E., González-Enríquez, R., Ruiz-Cruz, S. (2013). Evaluación de los procesos de desalinización y su desarrollo en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, IV (3), 27-46.
- García-García, V., Montiel, V., González-García, J., Expósito, E., Iniesta, J., Bonete, P., Inglés, M. (2000). The application of electro dialysis to desalting an amino acid solution. *Journal of Chemical Education*, 77 (11), 1477-1479.
- Hamani, H., Labcene, D., Boufeldja, C., Haddou, H., Kameche, M., Innocent, C., Derriche, Z., (2011). Study of Fouling of a cation exchange membrane with a surfactant using voltamperometry. *Separation Science and Technology*, 46, 2322-2331.
- Huang, C., Xu, T., Zhang, Y., Xue, Y., Chen, G. (2007). Application of electro dialysis to the production of organic acids: State of the art and recent developments. *Journal of Membrane Science*, 288 (1), 1-12.
- Ibáñez, J. P; Ipniza, J., Cifuentes, L. (2007). Separación electro dialítica de Cu (II) y As (V) en electrolitos ácidos. *Revista de Metalurgia*, 43 (1), 5-10.
- Kendall, A. I, Gebauer-Fuelnegg, E. (1931). Electro dialysis with simples apparatus, *Journal of Chemical Education*, 8 (8), 1634-1639.
- Lillo, A., Aros, H., Carlesi, C. (2011). Electrodiálisis en soluciones cianuradas. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 25, 54-61
- Mikhaylin, S., Nikonenko, V., Pismenskaya, N., Pourcelly, G., Choi, S., Kwon, H. J., Han, J., Bazinet, L. (2016). How physico-chemical and surface properties of cation Exchange membrane affect membrane saling and electroconvective vortices: influence on performance of electro dialysis with pulsed electric field, *Desalination*, 393, 102-114.
- Montes-Rojas, A., Álvarez-Cerda, L. M. (2009). Construcción y utilización de un electro dializador en serie para laboratorio, *Química Nova*, 32 (2) 493-497.
- Pis'menskaya, N. D., Nikonenko, V.V, Mel'nik, N. A., Pourcelli, G., Larchet, G., (2012). Effect of the ion-exchange membrane/solution interfacial characteristic on the mass transfer at several current regimes, *Russian Journal of Electrochemistry* 48 (6), 610-628.
- Scarazato T., Buzzi, D. C., Bernardes, A. M., Tenorio, J. A. S, Espinoza, D. C. R., (2015). Current-voltage curves for treating effluents containing HEDP: Determination of the limiting current, *Brazilien Journal of Chemical Engineering*, 32 (4), 831-836.
- Schuffe, J. A., (1961). Deionized water by Electro dialysis. *Journal of Chemical Education*, 38 (1), 17-19.
- Spiegler K. S. (1971). Polarization in ion exchange membrane-solution interfase. *Desalination*, 9, 367-385.