



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



LABORATORIO DE MEZCLADO, SEPARACIÓN Y SÍNTESIS INDUSTRIAL

Tratamiento de Efluentes utilizando la Técnica de Electrodiálisis

www.bdigital.ula.ve

TESISTA: Astrid M. Ramírez V.

TUTOR: Dr. Antonio L. Cárdenas

Mérida, marzo de 2009.



Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor,
la electricidad y la energía atómica:
la voluntad.

Albert Einstein

www.bdigital.ula.ve



DEDICATORIA

A DIOS por guiar cada paso de mi vida y darme sus bendiciones.

A mis padres, NILVA y BRUNO, por ser mi inspiración, mi refugio, la luz que guía mis pasos y los hombros donde descanso. Por ustedes soy quien soy, este logro es suyo.

A mis hermanos, BRUNO y NEI, por estar siempre allí, por creer en mí y por ser ustedes quienes me ayudaron a levantarme de mis caídas, sus palabras me dieron la fortaleza para seguir en el camino.

A CARLOS ALBERTO, a quien abrí mi corazón y con quien comparto mi vida, por tomarme de la mano y caminar juntos por este sendero.

A mis hermanos del alma, JESÚS, ROGELIO, Ma. ALEJANDRA, ELEAZAR, ELISA, PATRICIA, ALBERTO y EFRAÍN, hemos compartido tantos momentos, juntos emprendimos este viaje y hemos llegado al final del camino. Los llevo en mi corazón y sepan que aunque nuestros caminos se separen estaremos siempre juntos.

Dios los bendiga a todos,

Astrid M. Ramírez V.



AGRADECIMIENTOS

Al profesor ANTONIO CÁRDENAS, por brindarme la oportunidad de trabajar en el Laboratorio de Mezclado, Síntesis y Separación Industrial y permitirme llevar a cabo este proyecto, por transmitirme sus conocimientos, tanto profesionales como de la vida, y por inyectarme esa pasión por la investigación que lo caracteriza.

A JULIO HERNÁNDEZ, por tenerme paciencia, por estar siempre pendiente de mí y darme su amistad y colaboración en todo momento.

A YAJAIRA ARAQUE, por su confianza, por colaborar siempre conmigo y preocuparse constantemente de que nada pudiera detenerme en la realización de este proyecto.

A mis amigos del laboratorio, JESÚS, ELI, YSAMAR Y EFRAÍN, sin su compañía y su amistad incondicional el trabajo hubiera sido más difícil.

A todos, un millón de gracias,

Astrid M. Ramírez V.



RESUMEN

El petróleo, cuando es sacado a la superficie, trae consigo cantidades elevadas de agua asociada con un contenido de sales y minerales elevado, en especial iones cloruro. Estas aguas, bien sea para ser utilizadas en la inyección al pozo o para ser vertidas en los cursos de agua, deben ser tratadas acorde con la normativa ambiental vigente (Decreto 883) que establece que no pueden desecharse aguas con un contenido de iones cloruro superior a los 1000mg/L.

En este trabajo de investigación se realizaron pruebas de desalación al Agua de Producción del Campo La Victoria ubicado en el Estado Apure empleando la técnica de electrodiálisis utilizando un electrodiálizador modelo CH-O fabricado por Asahi Glass Company a distintas condiciones de operación, variando tanto la diferencia de potencial aplicada (30V, 15V y 10V) como la velocidad tangencial de flujo (100L/h, 200L/h y 300L/h). En todos los casos estudiados se constató que la transferencia de iones aumenta significativamente a medida que se aumenta tanto la diferencia de potencial aplicada como la velocidad tangencial de flujo. Con respecto a la disminución de la concentración de iones cloruro se logró alcanzar los 1000ppm reglamentarios en un tiempo de 3,932 minutos y, posteriormente se llegó a una concentración final de 14ppm Cl⁻, lo que representa un 99,6% de reducción de estos iones, esto a 30V y 300 L/h. En la mayoría de los casos fue posible superar el 90% de reducción de la dureza del agua. El consumo de energía en el equipo de electrodiálisis es bajo para los casos estudiados, por lo que el proceso es económico. El consumo más bajo se obtuvo operando a 10V y 100L/h, donde el consumo fue de 18,06 W.h/L, que representa un costo de 0,0014 BsF/L.

**ÍNDICE GENERAL**

Resumen	i
Índice de Tablas	v
Índice de Figuras	vi
Introducción	1
Objetivos de la Investigación	3
Capítulo I. Procesos con Membranas y Electrodiálisis	4
I.1.) Membranas	4
I.1.1.) Clasificación de las Membranas	5
a) Según su Naturaleza Química	6
b) Según su Estructura	7
I.1.2.) Modos de Funcionamiento de los Procesos con Membranas	10
I.1.3.) Técnicas de Separación con Membranas	11
a) Procesos originados por un Gradiente de Presión	11
b) Procesos que utilizan un Gradiente de Concentración	12
c) Procesos originados por un Gradiente de Potencial Eléctrico	13
I.1.4.) Tipos de Módulos empleados en la Separación con Membranas	14
I.2.) Electrodiálisis	16
I.2.1.) Membranas de Intercambio Iónico	17
I.2.1.1.) Estructura y Clasificación	19
a) Según su Capacidad de Intercambio	19
b) Según su Estructura Física	20
c) Según su Estructura Química	20
I.2.1.2.) Propiedades Fisicoquímicas	22
I.2.2.) Limitaciones de la Electrodiálisis	26



I.2.3.) Componentes de un Módulo de Electrodiálisis	30
I.2.4.) Configuraciones de Celda	32
I.2.5.) Modos de Operación	35
I.2.4.) Aplicaciones	37
Capítulo II. El Agua	39
II.1.) Contaminación del Agua	39
II.2.) Aguas Residuales	40
II.2.1.) Tipos de Aguas Residuales	40
II.2.2.) Características de las Aguas Residuales	42
II.2.2.1.) Características Físicas	42
II.2.2.2.) Características Químicas	43
II.2.2.3.) Características Biológicas	45
II.2.3.) Tratamiento de las Aguas Residuales	45
II.3.) La Electrodiálisis en el Tratamiento de las Aguas Residuales	46
II.4.) Aguas de Producción	47
II.5.) Legislación Ambiental	47
Capítulo III. Antecedentes de la Investigación	49
Capítulo IV. Metodología Experimental	51
IV.1.) Materiales de Laboratorio	51
IV.2.) Equipos	51
IV.3.) Reactivos	57
IV.4.) Metodología Experimental	58
IV.4.1.) Preparación de las Soluciones Empleadas	58
IV.4.2.) Filtración del Agua de Producción del Campo La Victoria, ubicado en el Estado Apure	58
IV.4.3.) Desalación de las Aguas de Producción del Campo La Victoria	59
IV.4.4.) Determinación de Cloruros empleando el Método de Mohr	60
IV.4.5.) Determinación de la Dureza del Agua y de los iones Calcio y	63



Magnesio empleando el Método de Volumetría de Formación de Complejos

IV.4.6.) Determinación del Consumo Energético	68
Capítulo V. Resultados	70
V.1.) Caracterización del Agua de Producción del Campo Petrolero La Victoria	70
V.2.) Resultados de las corridas de desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria	70
V.3.) Curvas de Cloruros obtenidas en la desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria	76
V.4.) Curvas de Dureza obtenidas en la desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria	81
V.5.) Curvas de Calcio obtenidas en la desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria	85
V.6.) Curvas de Magnesio obtenidas en la desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria	89
V.3.) Consumo Energético Total en la Electrodiálisis	92
Conclusiones	97
Recomendaciones	98
Referencias Bibliográficas	99
Anexo I. Desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria	101
Anexo II. Curvas de Cloruro del Agua de Producción del Campo La Victoria	110
Anexo III. Curvas de Dureza del Agua de Producción del Campo La Victoria	115
Anexo IV. Curvas de Calcio del Agua de Producción del Campo La Victoria	119
Anexo V. Curvas de Magnesio del Agua de Producción del Campo La Victoria	123
Anexo VI. Consumo Energético de las corridas de desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria	127



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.1. Propiedades de las Membranas de Intercambio Iónico Comerciales	21
Tabla IV.1. Reactivos Empleados	57
Tabla V.1. Características iniciales del Agua de Producción del Campo La Victoria	70
Tabla V.2. Condiciones de operación del Agua de Producción del Campo La Victoria	71
Tabla V.3. Resultados obtenidos en la determinación de iones cloruro realizada al Agua de Producción del Campo La Victoria a distintas condiciones de operación.	80
Tabla V.4. Resultados obtenidos en la determinación de la dureza del Agua de Producción del Campo La Victoria a distintas condiciones de operación.	84
Tabla V.5. Resultados obtenidos en la determinación de iones calcio realizada al Agua de Producción del Campo La Victoria a distintas condiciones de operación.	88
Tabla V.6. Resultados obtenidos en la determinación de iones magnesio realizada al Agua de Producción del Campo La Victoria a distintas condiciones de operación.	92
Tabla V.7. Consumo Energético de las distintas corridas de desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria.	95
Tabla V.8. Consumo Energético de las distintas corridas de desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria para alcanzar los 1000ppm Cl ⁻ reglamentarios.	96



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1. Membrana Selectiva	5
Figura I.2. Estructura Molecular de los Principales Materiales orgánicos de las Membranas	6
Figura I.3. Membranas Porosas	8
Figura I.4. Estructura de las Membranas Compuestas	8
Figura I.5. Estructura de las Membranas Densas	9
Figura I.6. Tipos de Filtración	10
Figura I.7. Módulo Plano	14
Figura I.8. Módulo Espiral	15
Figura I.9. Módulo Tubular	15
Figura I.10. Módulo de Fibras Huecas	16
Figura I.11. Módulo de Electrodiálisis	16
Figura I.12. Membrana de Intercambio Catiónico	18
Figura I.13. Gradientes de Concentración en interfase Solución – Membrana	26
Figura I.14. Tipos de Espaciadores	32
Figura I.15. Celda de Tres Compartimientos	33
Figura I.16. Celda de Cuatro Compartimientos	34
Figura I.17. Proceso Continuo	35
Figura I.18. Proceso Discontinuo o de Recirculación Total	35
Figura I.19. Proceso Semicontinuo o de Recirculación Parcial	36
Figura IV.1. Balanza Analítica Digital	51
Figura IV.2. Partes de un Electrodiализador	53
Figura IV.3. Circuitos Hidráulicos del Electrodiализador	54



Figura IV.4. Fuente de Poder Kikusui	54
Figura IV.5. Conductímetro	39
Figura IV.6. Equipo de Filtración con Papel Filtro	55
Figura IV.7. Filtro de Arena	56
Figura IV.8. Equipo de Medición de pH	56
Figura IV.9. Tester	56
Figura V.1. Variación de la conductividad de las soluciones en los compartimientos de Diluido y Concentrado en la desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria a distintas condiciones de operación, variando tanto la diferencia de potencial aplicada como la velocidad tangencial de flujo	72
Figura V.2. Corridas realizadas en el electrodiálizador aplicando una diferencia de potencial constante, variando la velocidad tangencial de flujo	73
Figura V.3. Comparación de las corridas realizadas en el electrodiálizador a velocidad tangencial de flujo constante, variando la diferencia de potencial	74
Figura V.4. Disminución de la conductividad del agua de producción del Campo La Victoria de cada una de las corridas realizadas en el electrodiálizador	75
Figura V.5. Curvas de Cloruros obtenidas en las corridas de desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria	77
Figura V.6. Curvas de Cloruros (Cl^-) de los compartimientos de Diluido aplicando una diferencia de potencial constante y variando la velocidad tangencial de flujo	78
Figura V.7. Curvas de Cloruros (Cl^-) de los compartimientos de Diluido operando a una velocidad tangencial de flujo constante y variando la diferencia de potencial aplicada	79
Figura V.8. Curvas de Dureza obtenidas en las corridas de desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria	82
Figura V.9. Curvas de Dureza (ppm CaCO_3 equivalentes) de los compartimientos de Diluido operando a una diferencia de potencial constante y variando la velocidad tangencial de flujo	83
Figura V.10. Curvas de dureza (ppm CaCO_3 equivalentes) de los compartimientos de Diluido operando a velocidad tangencial de flujo constante y variando la diferencia de potencial	84
Figura V.11. Curvas de Calcio obtenidas en las corridas de desalación del Agua de	86



Producción del Campo La Victoria

Figura V.12. Curvas de Calcio (Ca^{2+}) de los compartimientos de Diluido operando a una diferencia de potencial constante y variando la velocidad tangencial de flujo 87

Figura V.13. Curvas de Calcio (Ca^{2+}) de los compartimientos de Diluido operando a una velocidad tangencial de flujo constante y variando la diferencia de potencial 88

Figura V.14. Curvas de Magnesio obtenidas en las corridas de desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria 90

Figura V.15. Curvas de Magnesio (Mg^{2+}) de los compartimientos de Diluido operando a diferencia de potencial constante (a, b y c) y a velocidad tangencial de flujo constante (d, e y f) 91

Figura V.16. Aplicación de la Ley de Ohm 93

Figura V.17. Variación de la Intensidad de Corriente en las corridas de desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria 94

Figura V.18. Consumo Energético de las corridas de desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria 95

Figura V.19. Consumo Energético de las corridas de desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria, al alcanzar los 1000ppmCl reglamentarios 96



INTRODUCCIÓN

El agua, con excepción del aire, es la sustancia más importante para la supervivencia de todos los seres vivos. A medida que la población mundial crece, también lo hace la demanda de agua dulce ya que se hace necesaria la inclusión de gran cantidad de industrias dirigidas a producir bienes y productos para satisfacer todas las necesidades del hombre. Sin embargo, este crecimiento industrial ha traído consigo una gran cantidad de desechos que son vertidos a los cursos de agua ocasionando un cambio sustancial de la naturaleza de las aguas naturales y dificultando su uso para los fines a que estaba destinada.

Una de las industrias más importantes a nivel mundial es la industria petrolera puesto que el petróleo constituye la fuente de energía por excelencia. En los yacimientos de petróleo se encuentra una gran cantidad de agua asociada al mismo con un contenido de sales, metales pesados y sólidos totales disueltos elevado, denominadas Aguas de Producción. En la actualidad se ha encontrado que por cada barril de petróleo se producen en general varios barriles de agua, en algunos casos, como en el Campo La Victoria estudiado, se llegan a producir 100.000 barriles de agua por día, lo que representa un grave problema puesto que al poseer alto contenido de minerales esta agua debe ser tratada antes de ser vertida en los cuerpos de agua o de ser utilizada de nuevo en la inyección al pozo, para cumplir con las normas ambientales establecidas en pro de no alterar el ecosistema.

Una de las técnicas empleadas en la desalación de aguas salobres es la Electrodiálisis en donde, bajo la acción de una diferencia de potencial y la presencia de membranas de intercambio iónico, puede lograrse la separación de los iones contenidos en soluciones acuosas. Esta técnica ya se ha utilizado en el tratamiento de aguas salobres y se ha mejorado en los últimos años, logrando separaciones más eficientes y de bajo costo.

En este trabajo de investigación se estudia la factibilidad de tratar aguas de producción de salinidad media empleando la técnica de electrodiálisis, con el objetivo de reducir sus iones en solución, especialmente los cloruros y llevarlos por debajo de



los límites que imponen la leyes, que en el caso de Venezuela son de un máximo de 1000 ppm según lo estipula el decreto 883.

El trabajo consta de varios capítulos, en el primer capítulo se describen los procesos de separación con membranas, haciendo énfasis en la separación mediante la electrodiálisis. En el segundo capítulo se escribe sobre el agua, que es el elemento fundamental en este estudio y sobre la cual se propone el método de la electrodiálisis para su tratamiento. Luego en el tercer capítulo se resumen los estudios relacionados con el trabajo realizado, bajo el título de antecedentes. En el cuarto capítulo se describe la metodología experimental y en el quinto capítulo se discuten los resultados obtenidos, cuyos resultados más importantes se resumen en las conclusiones. También, al final, se presentan algunas recomendaciones para seguir con este interesante estudio.

www.bdigital.ula.ve



OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

OBJETIVO GENERAL

- ♦ Tratar efluentes empleando la Técnica de Electrodiálisis para disminuir la concentración de iones que no cumplan con los requerimientos ambientales, especialmente los iones cloruro (Cl⁻).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ♦ Tratar Aguas de Producción provenientes del Campo de La Victoria (Estado Apure), operado por PDVSA como efluente “real”.
- ♦ Llevar la concentración de cloruros a cumplir con el Decreto 883 y estudiar qué niveles de remoción se pueden alcanzar bajo las condiciones de operación estudiadas.
- ♦ Estudiar el efecto de la Diferencia de Potencial en el tratamiento de las aguas de producción.
- ♦ Estudiar el efecto de la Velocidad Tangencial en la extracción de los iones.
- ♦ Conocer el Consumo Energético en el tratamiento de las aguas de producción a distintas condiciones de operación.



CAPÍTULO I. PROCESOS CON MEMBRANAS Y ELECTRODIÁLISIS

Los procesos de separación con membranas adquieren cada día mayor importancia debido a su capacidad de separación y, en general, bajo consumo de energía. A continuación se describe lo que son las membranas y algunas características de las mismas.

I.1.) Membranas

Una membrana es una fase permeable o semi-permeable (polimérica, inorgánica o metálica), que restringe el movimiento de ciertas especies. La membrana controla la tasa relativa de transporte de las distintas especies a través de sí misma y, por lo tanto, al igual que sucede en todas las separaciones, se obtiene un producto agotado en algunos componentes y, un segundo producto concentrado en esos mismos componentes (Figura I.1). El desempeño de una membrana se define en función de dos factores simples:

- ♦ **Flujo:** Se refiere al flujo volumétrico de fluido (molar o en masa) que pasa a través de la membrana por unidad de área de la membrana por unidad de tiempo.
- ♦ **Selectividad y Retención:** La selectividad es una medida de la permeabilidad relativa de cada uno de los distintos componentes a través de la membrana, mientras que la retención se refiere a la fracción de soluto que queda retenida por dicha membrana.

Generalmente se requiere de membranas con una elevada selectividad y flujo, aunque normalmente se intenta aprovechar al máximo uno de estos factores puesto que, el incremento de alguna de estas variables implica la reducción de la otra.

La principal característica que distingue a un proceso de separación con membranas de otros procesos de separación es precisamente que la misma introduce



una interfase entre las demás fases involucradas en la separación, proporcionando de esta manera ventajas en lo que respecta a eficiencia y selectividad del proceso. [1]

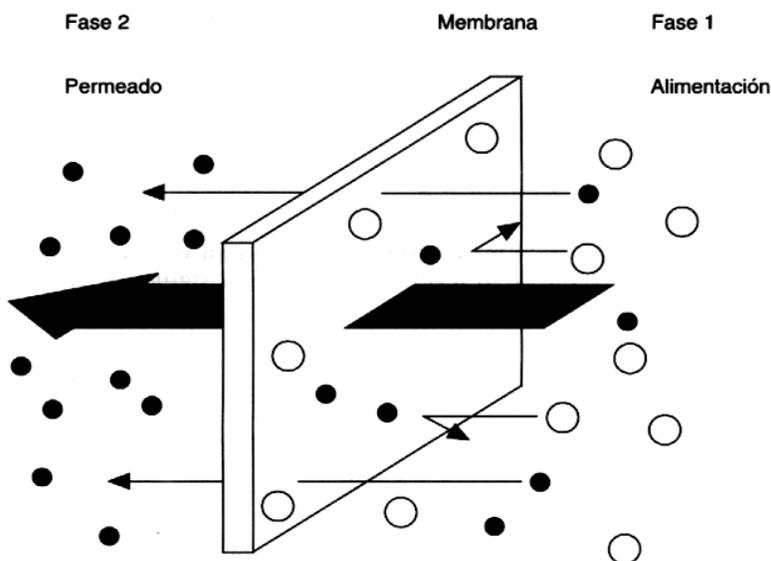


Figura I.1. Membrana Selectiva.

www.bdigital.ula.ve

I.1.1.) Clasificación de las Membranas

Es importante señalar que existen membranas de origen natural y que están presentes en todo ser vivo (plantas, animales, seres humanos). Por citar un ejemplo, recordemos que las células están rodeadas por una membrana o pared celular, que no es más que una barrera semipermeable y selectiva que permite o no el paso de moléculas hacia el interior de la célula o hacia su exterior.

Sin embargo, existen también las membranas sintéticas que no son más que todas aquellas a las que el hombre ha dado algún tratamiento para ser empleadas en un proceso específico o, simplemente, han sido creadas por él. Estas últimas han sido clasificadas de diversas maneras, como se muestra a continuación:



a) Según su Naturaleza Química

♦ **Membranas Orgánicas:** Estas membranas son generalmente sintetizadas con polímeros y las primeras se prepararon a partir de la celulosa y sus derivados. En la actualidad, las membranas derivadas de la celulosa, son poco usadas debido a que presentan resistencia limitada a los productos químicos y a la temperatura, por esta razón, se hicieron estudios posteriores para mejorar sus características y así fueron desarrolladas membranas más resistentes como poliamidas, polisulfonas, polímeros acrílicos y polímeros perfluorados. Entre sus principales características se tiene que hay una gran variedad en cuanto a su naturaleza química, poseen una gran gama de tamaño de poros, tienen resistencia limitada a los solventes y pH externos y su vida es relativamente corta, aunque hay aplicaciones en las cuales pueden durar alrededor de 5 años. En la Figura I.2 se pueden observar las estructuras moleculares de los principales materiales orgánicos de las membranas.

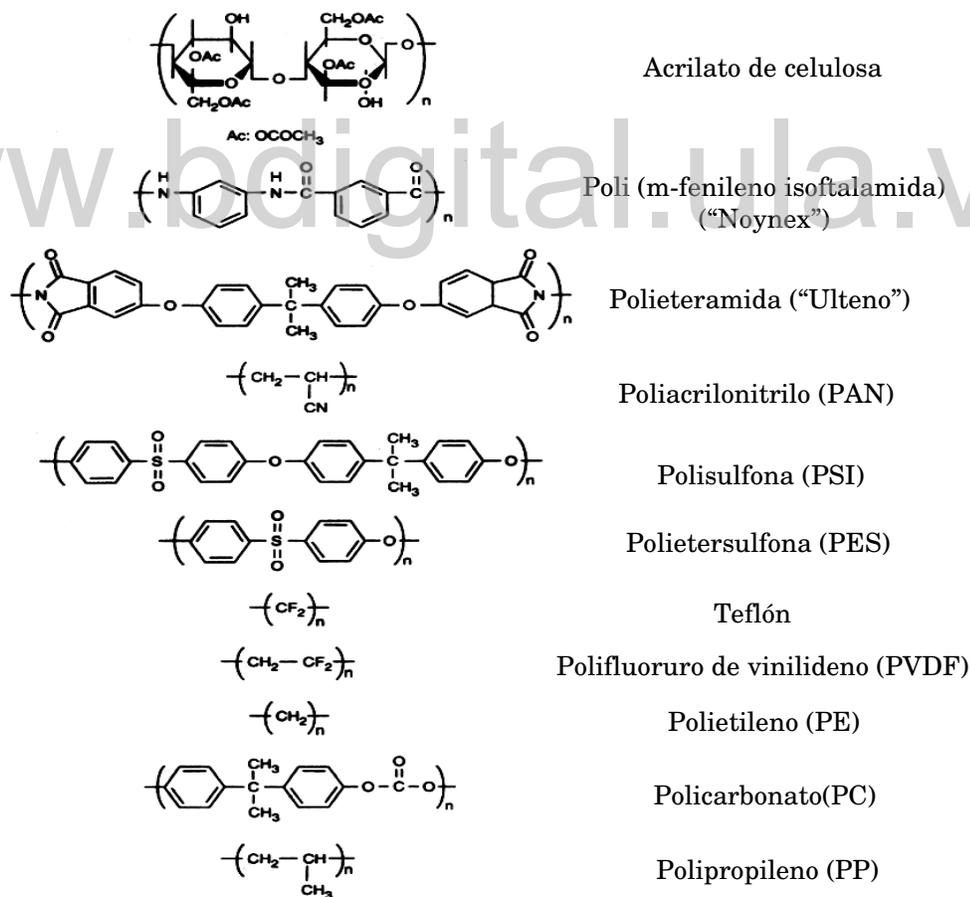


Figura I.2. Estructura Molecular de los principales materiales orgánicos de las membranas.



♦ **Membranas Inorgánicas:** Surgieron para tratar de solventar las debilidades de las membranas orgánicas y su uso es más reciente. Las membranas cerámicas constituyen la categoría de membrana inorgánica más utilizada y son más resistentes mecánica, térmica y químicamente que las orgánicas, aunque su precio es más elevado; otros tipos de membranas inorgánicas son preparadas a partir de vidrio, de carbón ó metal. Entre sus características principales pueden citarse que son inertes a solventes orgánicos y medios corrosivos, se pueden limpiar fácilmente por contrapresión, son estables frente a las bacterias, se pueden limpiar fácilmente con vapor y tienen una larga vida.

♦ **Membranas Mixtas:** Son las membranas de última generación, entre ellas se pueden nombrar a las membranas de transporte facilitado sobre soporte sólido. Éstas consisten de un esqueleto inorgánico al cual se le han agregado grupos orgánicos para darle alguna característica especial como hidrofobismo o lipofobismo. Con este tipo de membranas se trata de obtener las ventajas de las dos anteriores. Generalmente se tiene un compromiso, por ejemplo, se puede subir la resistencia mecánica con respecto a una orgánica pero se baja la resistencia térmica con respecto a una inorgánica. [2]

b) Según su Estructura

Las membranas pueden ser:

♦ **Membranas Porosas:** Son las membranas más simples en lo que se refiere a transporte y separación. Estas membranas están constituidas por una matriz sólida con agujeros definidos o poros, por lo que la separación se realiza por un mecanismo de tamizado, el cual es función del tamaño de los poros y del tamaño de las especies químicas involucradas. Las encontramos de dos tipos, las *Membranas Simétricas* en las cuales el tamaño del poro es del mismo ancho a través de toda su longitud y, las *Membranas Asimétricas* (Figura I.3.b) donde el diámetro del poro es desigual a lo ancho de la membrana. Según el tamaño del poro pueden distinguirse tres grupos de membranas simétricas (Figura I.3.a):

- **Macroporosas:** el tamaño de los poros es de diámetro superior a 50nm.
- **Mesoporosas:** el tamaño de los poros abarca diámetros entre 2nm a 50nm.
- **Microporosas:** el tamaño de los poros es de diámetro inferior a 2nm.

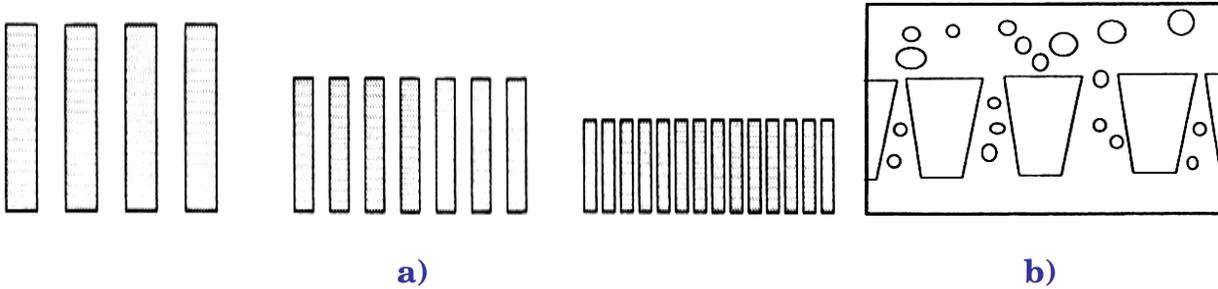


Figura I.3. Membranas Porosas. a) Simétricas. b) Asimétricas.

♦ **Membranas Compuestas:** Son membranas que presentan capas diferentes con distintos diámetros de poro (Figura I.4), las mismas consisten en una capa polimérica o inorgánica muy delgada (que puede abarcar desde 100nm a 200nm) situada sobre una o varias capas gruesas altamente porosas que actúan como soporte.

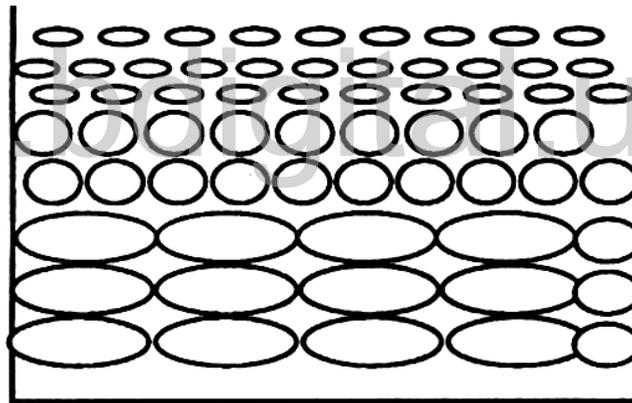


Figura I.4. Estructura de las Membranas Compuestas.

♦ **Membranas Densas:** Estas membranas se caracterizan por la ausencia de porosidad (Figura I.5), las especies químicas son separadas mediante un efecto de solución y difusión en la membrana. En esta categoría pueden incluirse las membranas líquidas, ciertas membranas metálicas (Pd y Pt) y algunas membranas inorgánicas, como las de ósmosis inversa.

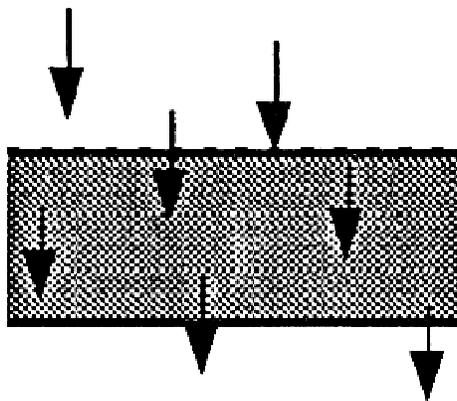


Figura I.5. Estructura de las Membranas Densas.

- ♦ **Membranas Intercambiadoras de Iones:** Se llaman así porque poseen carga eléctrica y la separación se basa en la exclusión de las especies químicas que tengan la misma carga que la de las membranas. [3]

Hasta ahora, una membrana se ha relacionado con una barrera o una película sólida, sin embargo se puede pensar en la existencia de membranas líquidas, las cuales han sido objeto de un gran número de estudios. Las membranas líquidas pueden clasificarse como sigue:

- ♦ **Membranas Líquidas en Volumen (“Bulk”):** En este tipo de membranas un líquido (que sería la membrana) se pone en contacto con dos fases inmiscibles con él. Son muy utilizadas a nivel de laboratorio, especialmente en los estudios que involucran a los *Transportadores*, que son moléculas o compuestos solubles a la fase membrana y poco soluble en las otras dos fases. Los transportadores son los que hacen posible que el componente que desea separarse (que es insoluble en la membrana) entre en la membrana y pueda ser transportado a través de la misma. [8]

- ♦ **Membranas Líquidas Emulsionadas:** Son membranas en las cuales una emulsión múltiple hace las veces de barrera separadora. Poseen una alta área de transferencia.

- ♦ **Membranas Líquidas Soportadas:** Son aquellas en las cuales se introduce un líquido inmiscible en los poros de una membrana (que actúa como



soporte) que separa dos fases. Estas membranas pueden ser acuosas u orgánicas, aunque las más utilizadas son las orgánicas.

I.1.2.) Modos de Funcionamiento de los Procesos con Membranas

Existen dos maneras de efectuar la separación en los procesos con membranas (Figura I.6):

♦ **Filtración Frontal:** Es la forma de filtración clásica. Este tipo de filtración es útil cuando la cantidad a filtrar es poca, ya que a medida que se filtra se forma una capa de material sobre el filtro (torta de filtración) que hace que la resistencia aumente progresivamente, lo que implica que se debe ejercer una presión cada vez mayor para obtener el caudal de filtración deseado, pero esto puede hacerse hasta un valor límite de presión puesto que se podría romper el filtro y además el costo de energía se hace muy alto.

♦ **Filtración Tangencial:** Es la forma de filtración más empleada a nivel industrial pues presenta la ventaja de que, debido a la disposición del fluido, resulta más difícil que ocurra el taponamiento del medio filtrante ya que la capa que se forma es muy pequeña y también permite la operación en continuo. ^[2]

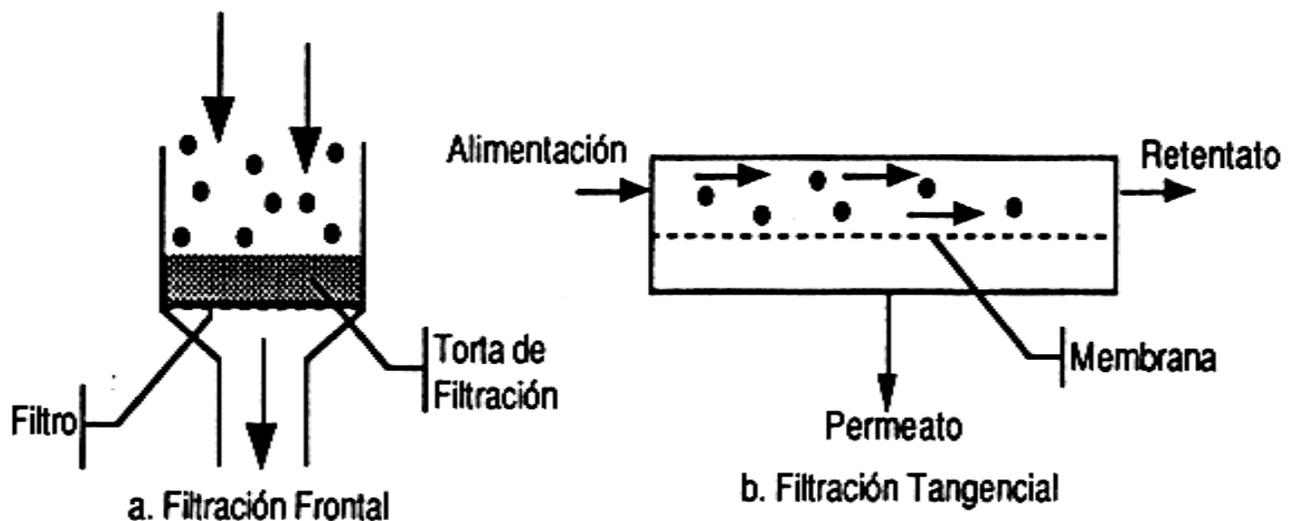


Figura I.6. Tipos de Filtración.



I.1.3.) Técnicas de Separación con Membranas

Para que ocurra la separación de distintas especies a través de una membrana es necesario que exista un gradiente de potencial químico; este gradiente puede deberse a una diferencia de presión, concentración y potencial eléctrico. A continuación se muestran las diferentes técnicas de filtración según el gradiente más importante para cada uno de ellos:

a) Procesos originados por un Gradiente de Presión

El propósito principal de estas técnicas de separación es lograr una separación de las especies mediante una filtración, sus principios de operación son básicamente dos, una separación por efecto tamiz, es decir, por el tamaño de partícula que atraviesan los poros (MF, UF, NF) y la otra por solubilidad de las moléculas en la membrana (OI). Dichas especies pueden encontrarse en suspensión o bien sea disueltas en el líquido a tratar. Los procesos se describen a continuación:

♦ **Microfiltración (MF):** Es la técnica de separación con membranas más utilizada a nivel industrial para separar partículas sólidas de una sustancia líquida o gaseosa por efecto de tamizado. Es usada cuando las partículas a separar de un disolvente tienen diámetros de $0,1\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$. Se utilizan membranas macroporosas simétricas con tallas de poros de $0,1\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$, con diferencias de presión a través de la membrana de $0,1\text{bar}$ a $0,2\text{bar}$. Entre los usos más empleados de la microfiltración hallamos el tratamiento y depuración de aguas residuales, la descontaminación de líquidos de interés para la industria farmacéutica, la recuperación de sales metálicas cristalizadas y la concentración de suspensiones de látex, etc. [3]

♦ **Ultrafiltración (UF):** Al igual que la microfiltración, es una técnica que permite la separación de moléculas disueltas en función de su tamaño, al hacer pasar una solución bajo presión a través de una membrana. Esta técnica separa moléculas o pequeñas partículas de menos de $0,3\mu\text{m}$ de diámetro, con pesos moleculares entre 1.000 daltons y 30.000 daltons. Se utilizan membranas de tipo asimétrica con mesoporos; al ser asimétrica, la membrana presenta una capa muy delgada, que reduce la resistencia de la misma. Las presiones abarcan desde 1bar a 5bar . Es un proceso simple y de bajo costo de operación. Entre las aplicaciones



encontramos la recuperación de pinturas de carrocerías de autos, la concentración de leche y jugos de frutas y para aislar y concentrar enzimas, virus y ácidos nucleicos en la industria farmacéutica, etc. [3]

♦ **Nanofiltración (NF)**: Es una técnica que cubre un rango de separación entre la ultrafiltración y la ósmosis inversa. Esta técnica separa moléculas orgánicas con una gama de pesos moleculares entre 200 daltons y 600 daltons y sales minerales a bajas concentraciones, en las cuales se aplican presiones entre 10bar y 40bar. Estas membranas presentan, en general, una estructura asimétrica a tres niveles; en primer lugar se tiene un soporte macroporoso que ofrece una buena resistencia mecánica con flujos de solventes elevados; en segundo lugar, se tiene una capa intermedia mesoporosa que asegura la unión entre el soporte y una capa activa en tercer lugar, la misma, está constituida de un material orgánico o inorgánico que presenta una estructura microporosa con diámetros de poros en el orden de un nanómetro. Esta técnica se aplica en la separación y concentración de antibióticos, en el fraccionamiento de aminoácidos y en la desmineralización y concentración del lacto suero, entre otras. [3]

♦ **Ósmosis Inversa (OI)**: Esta técnica utiliza las propiedades de las membranas semipermeables a través de las cuales el agua migra, mientras que todos los solutos son retenidos, a excepción de algunas moléculas orgánicas muy parecidas al agua, de muy bajo peso molecular y fuerte polaridad. En esta operación es necesario aplicar presiones superiores a la presión osmótica del sistema, para hacer pasar al agua y poder así separar los solutos, las mismas se encuentran entre 20bars y 100bars. En este proceso se utilizan membranas asimétricas que poseen una capa muy delgada y densa sobre un soporte poroso. Su mayor aplicación es la producción de Agua Potable a partir de Aguas Salobres, pero entre otras, encontramos la fabricación de soluciones inyectables, separación de virus y bacterias y producción de agua ultrapura para diálisis renal. [3]

b) Procesos que utilizan un Gradiente de Concentración

♦ **Pervaporación**: En este proceso se alimenta una corriente líquida de un lado de la membrana y del lado opuesto se tiene un compartimiento con una presión más baja, incluso menor que la presión de vapor. Debido a esto ocurre el transporte de las especies a través de la membrana, este transporte involucra un



cambio de fase, apareciendo así una fase vapor, que luego será condensada para obtener un producto líquido. Este proceso ocurre en tres pasos básicos: absorción selectiva en la membrana del lado de la alimentación, difusión a través de la membrana y, finalmente, desorción del producto hacia la fase vapor. En la pervaporación se utilizan membranas densas que basan su selectividad en la afinidad del componente a separar en la misma. Entre sus aplicaciones encontramos la producción de alcohol puro, la deshidratación de solventes orgánicos y desalcoholización de la cerveza y el vino. ^[1]

- ♦ **Diálisis:** Este método es muy empleado en la desintoxicación de líquidos biológicos. La separación ocurre porque existe un gradiente de concentración a ambos lados de la membrana y, por ende, se produce un flujo de soluto que tiende a igualar las concentraciones. La aplicación más conocida es la diálisis sanguínea, donde la membrana sustituye al riñón. La idea es separar los productos tóxicos producidos por el organismo como la úrea y la creatinina. Las membranas de diálisis de riñón representan el 80% del mercado mundial de membranas. ^[2]

c) Procesos originados por un Gradiente de Potencial Eléctrico

- ♦ **Electrodiálisis:** Este proceso permite separar iones mediante la utilización de membranas catiónicas y aniónicas, que sólo permiten el paso de cationes y aniones respectivamente. Entre las aplicaciones con mayor relevancia se encuentran la desalación de aguas salobres, la producción de salmuera a partir del agua de mar y la desmineralización del lacto suero, aunque se están desarrollando nuevas aplicaciones. Este proceso será descrito con detalle más adelante. ^[2]

- ♦ **Electro – Electrodiálisis:** En su forma más simple permite, a partir de una solución que contiene una mezcla de ácido y sal metálica, eliminar el ión metálico, recuperarlo en forma de depósito catódico e, igualmente recuperar el ácido en el anolito, el cual puede ser concentrado. Esta técnica emplea un electrolizador entre la membrana intercambiadora de iones que presenta una pequeña fuga de protones. La solución a tratar es introducida en el compartimiento catódico, el metal es obtenido por deposición del catión metálico sobre el cátodo y, el anión, es transferido al compartimiento anódico donde se combina con los protones generados por electrólisis anódica del agua para formar el ácido. La aplicación más importante de este proceso es la producción de cloro – soda. ^[3]



I.1.4.) Tipos de Módulos empleados en la Separación con Membranas

Las membranas se presentan en arreglos espaciales denominados módulos. Estos arreglos permiten, según sea el caso, tener la mayor superficie de intercambio entre la membrana y el fluido a tratar, condiciones adecuadas de flujos para evitar su taponamiento, facilidad de limpieza y bajo mantenimiento. Los encontramos de geometrías distintas:

- ♦ **Módulo Plano:** Este es el modelo más simple y se deriva de los filtros – prensa. Los compartimientos están ubicados en paralelo y cada una de las membranas está separada de la otra por un separador inerte, el cual las provee de la resistencia mecánica (Figura I.7). Estos módulos pueden ensamblarse de forma horizontal o vertical y se encuentran en cantidad de procesos como microfiltración, ultrafiltración y electrodiálisis.

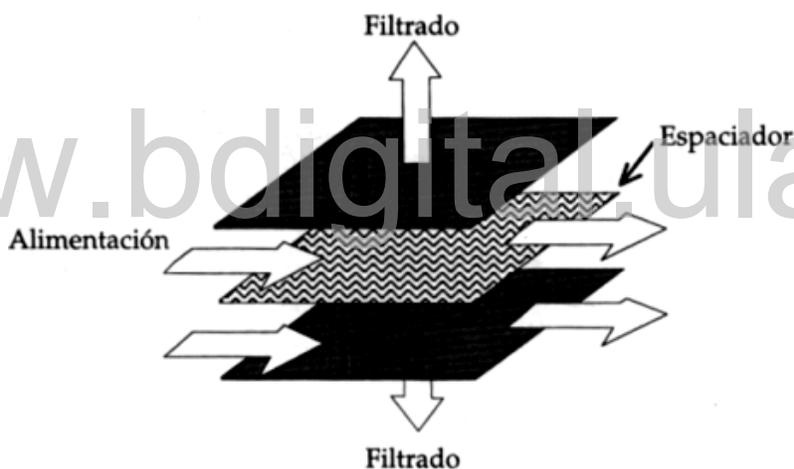


Figura I.7. Módulo Plano.

- ♦ **Módulo Espiral:** Están contruidos mediante un simple enrollamiento tipo sándwich, constituido por dos separadores y dos membranas planas que deben tener cierta flexibilidad. Desde el punto de vista de la membrana, se trata de una variante de módulos planos, pues las membranas (de gran tamaño) y los soportes se encuentran doblados sobre un tubo que se encarga de recolectar el filtrado (Figura I.8). Son de uso muy frecuente en Ósmosis Inversa pero su desventaja radica en que se taponan muy fácilmente y se dificulta su limpieza.

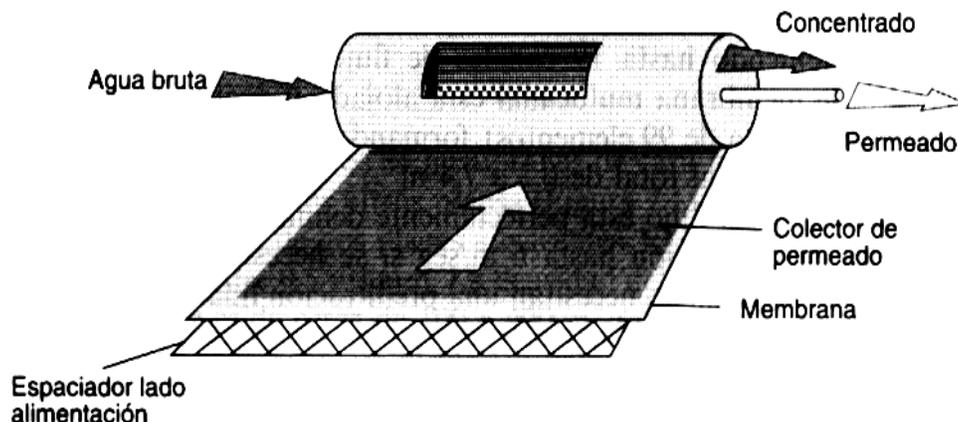


Figura I.8. Módulo Espiral.

♦ **Módulo Tubular:** Es uno de los diseños industriales que primero se comercializó y se encuentran en todos los procesos de separación en fase líquida o gaseosa. Suelen estar constituidos por una serie de canales internos cuya capa selectiva está en el interior. La alimentación y el retenido circulan generalmente por el interior, mientras que el permeado es recogido en el exterior (Figura I.9). Los tubos pueden extraerse de la unidad fácilmente por lo que representan muchas ventajas en lo que respecta a limpieza de la unidad. [3]

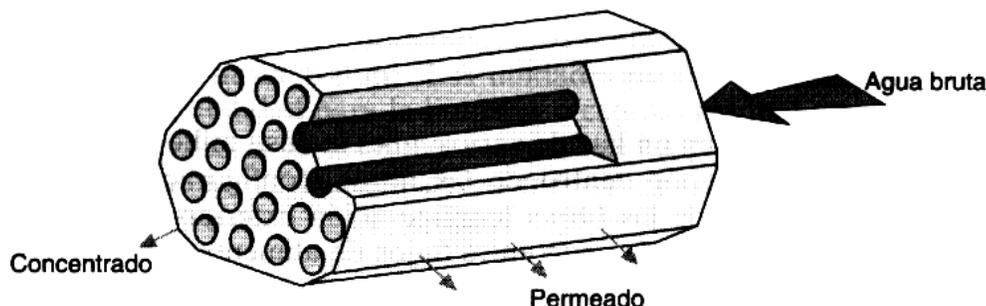


Figura I.9. Módulo Tubular.

♦ **Módulo de Fibras Huecas:** Estos módulos consisten en una gran cantidad de pequeños tubos de algunas decenas de micrómetros de diámetro (Figura I.10). Este tipo de ensamblaje permite obtener superficies de intercambio muy elevadas, del orden de $1200 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Estos módulos presentan el inconveniente de que si falla una fibra, hay que cambiarlo por completo. Poseen un precio relativamente bajo. [2]

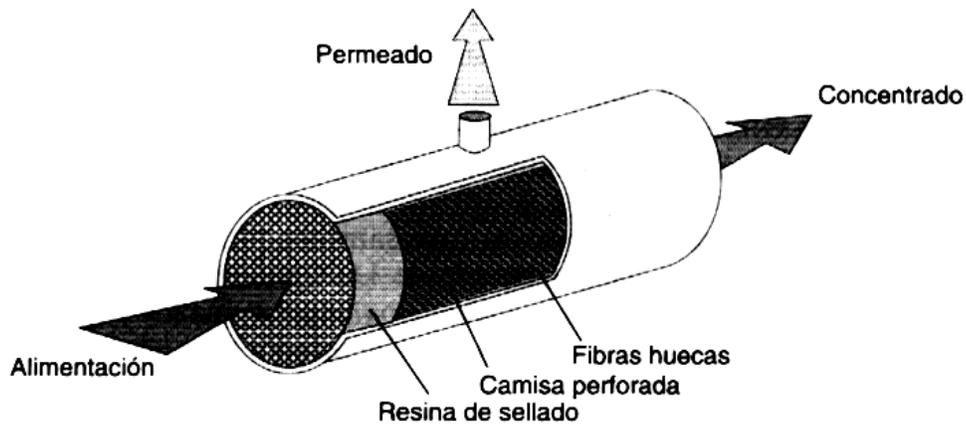


Figura I.10. Módulo de Fibras Huecas.

I.2.) Electrodialisis

La Electrodialisis es una tecnología de membranas que permite, bajo la influencia de un campo eléctrico continuo, extraer sustancias orgánicas e inorgánicas ionizadas disueltas en una disolución acuosa, a través de membranas selectivas de intercambio iónico.

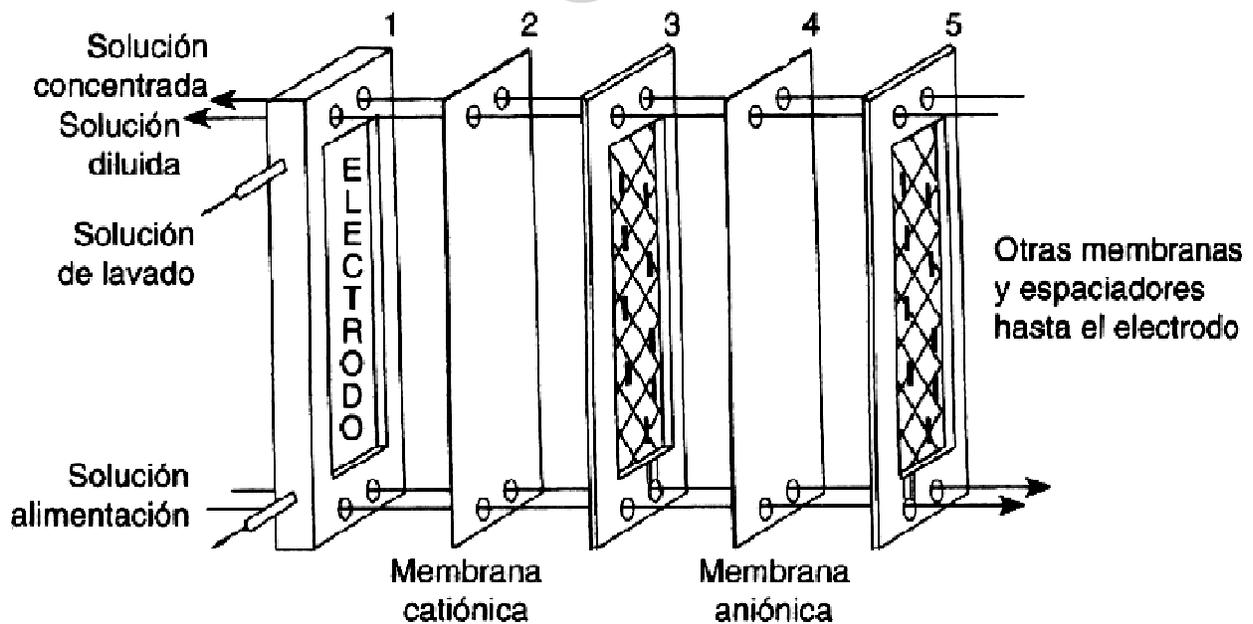


Figura I.11. Módulo de Electrodialisis.



La unidad de electrodiálisis más simple consta de dos compartimientos, por el compartimiento de Diluido (D) circula la disolución cuyos iones se desea extraer y, por el compartimiento de Concentrado (C), la disolución en la que dichos iones se van a concentrar (Figura I.11). La unidad está formada por un conjunto de membranas de intercambio catiónico (permeables sólo a los cationes) y membranas de intercambio aniónico (permeables sólo a los aniones) dispuestas alternativamente entre dos electrodos, de tal forma que dan lugar a compartimientos alternativos de diluido y concentrado.

Al aplicar una diferencia de potencial entre los electrodos, los aniones migran a través de las membranas de intercambio aniónico desde los compartimientos D a los C, donde quedan atrapados pues en su camino se interpone la barrera iónica constituida por las membranas de intercambio catiónico. Análogamente, los cationes migran desde los compartimientos D a los C, donde se concentran al impedirle las membranas aniónicas su migración hacia el cátodo. ^[4] Esta migración conjunta de los cationes y aniones permite mantener la electroneutralidad de las soluciones y que el proceso siga operando.

En un módulo de electrodiálisis las membranas de intercambio aniónico y las membranas de intercambio catiónico se colocan de forma alterna, como se dijo anteriormente, de manera similar a un filtro prensa. Ellas se separan por juntas de separación, en el interior de las cuales hay una malla plástica que sirve a la vez como promotor de turbulencia y como soporte para las membranas. El espesor de los separadores es del orden de 0,5mm. La distribución de los fluidos se hace con orificios colocados en la periferia de las juntas de las membranas. A cada extremo del módulo se encuentran los compartimientos de los electrodos con un circuito independiente. Los electrodos pueden ser de grafito o pueden ser metálicos adaptados a la electrólisis del agua: ánodo en titanio platinado y cátodo en acero inoxidable. ^[5]

I.2.1.) Membranas de Intercambio Iónico

Una membrana de intercambio iónico es una película delgada de textura polimérica orgánica que contiene grupos iónicos injertados. Sumergidos en un electrolito, estos grupos iónicos fijados, llamados también *sitios funcionales*, se equilibran con iones del electrolito de carga opuesta, llamados *contraiones*. Los iones



del electrolito de misma carga eléctrica que la de los sitios funcionales se llaman *coiones*. En la Figura I.12 podemos observar una membrana de intercambio catiónico y su mecanismo de transporte de los cationes bajo la acción de un campo eléctrico, de manera análoga operan las membranas de intercambio aniónico.

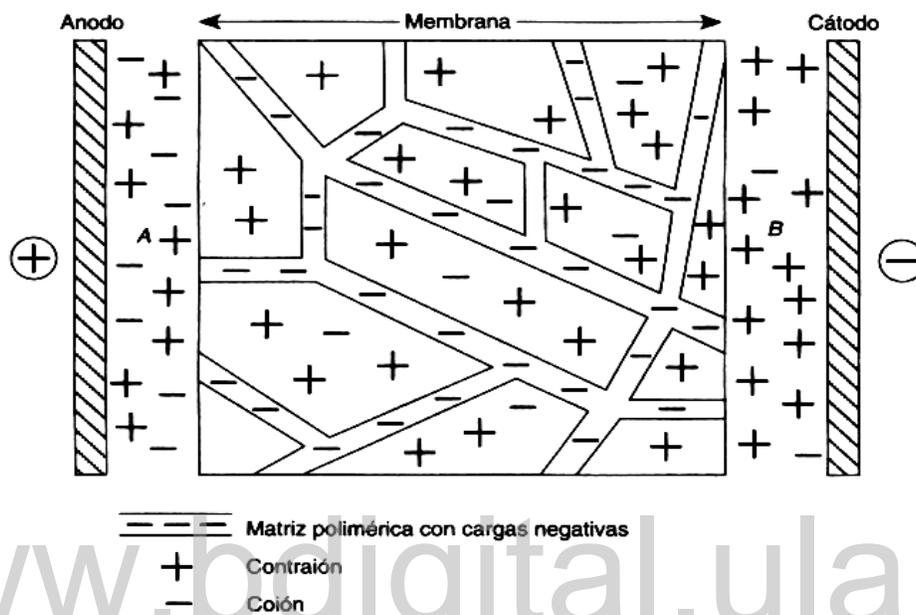


Figura I.12. Membrana de Intercambio Catiónico.

Cuando una membrana de intercambio iónico está sometida a una diferencia de potencial eléctrico, los contraiones en solución atraviesan la membrana, desplazándose de sitio en sitio. La presencia de sitios funcionales en la membrana asegura una gran movilidad a los contraiones. Al contrario, la movilidad de los coiones se reduce, ya que su transporte es inhibido por la presencia de los sitios funcionales. Se habla de transporte iónico selectivo y de permselectividad para estas membranas que bajo una diferencia de potencial eléctrico son permeables selectivamente a los iones de un electrolito. [6]

Para que una membrana pueda cumplir correctamente su función de intercambio, los intersticios de la red polimérica deben estar embebidos en el disolvente, casi siempre agua; es decir, la membrana se presenta como un gel hinchado por el disolvente. [4]



I.2.1.1) Estructura y Clasificación de las Membranas de Intercambio Iónico

Las membranas de intercambio iónico se pueden clasificar según:

a) Según su capacidad de Intercambio

♦ **Aniónicas:** Contienen grupos catiónicos fijados asegurando el transporte de los aniones. Los grupos más usados en las membranas de uso comercial son los amonios cuaternarios ($-\text{NH}_3^+$) ó las aminas terciarias ($-\text{NR}_2$).

♦ **Catiónicas:** Contienen grupos aniónicos fijados asegurando el transporte de los cationes. Los grupos más usuales son los sulfonatos ($-\text{SO}_3^-$) y los carboxilatos ($-\text{COO}^-$). [4]

Estas membranas pueden ser *débiles* cuando los grupos intercambiadores de iones se disocian parcialmente en medio acuoso ó *fuertes* si los grupos intercambiadores de iones se encuentran disociados completamente en todo el intervalo de pH.

♦ **Bipolares:** Están compuestas por dos grupos diferentes de cada lado de las caras, uno de carga positiva y otro de carga negativa. Están constituidas bien sea por la aplicación de una membrana de intercambio aniónico contra una membrana de intercambio catiónico, soldadas por un compatibilizante orgánico de la misma composición que el soporte de las dos membranas ó bien, están compuestas de una película polimérica única, injertada de cada lado de una manera diferente, una cara con grupos positivos y la otra con grupos negativos. Estas membranas presenta una propiedad muy interesante de disociar el agua bajo el efecto de un campo eléctrico y de generar los protones de una cara y los iones OH^- en la otra. [6]



b) Según su Estructura Física

♦ **Homogéneas:** Estas membranas constan de una fase polimérica continua que contiene grupos intercambiadores de iones químicamente enlazados a la cadena polimérica. Se obtienen por dos vías:

- Por policondensación de un monómero de intercambiadores iónicos ó copolimerización de dos monómeros, uno de los cuales es un intercambiador iónico.
- Por injerto químico o radio-químico de grupos iónicos sobre una película polimérica. De este tipo son la mayoría de las membranas comerciales.

♦ **Heterogéneas:** Están constituidas por dos fases poliméricas diferentes. Se fabrican mezclando resinas de intercambio iónico de muy fina granulometría con un ligante orgánico (cloruro de polivinilo, polietileno) para formar hojas que incluyen una trama (tejido de poliéster, poliacrilonitrilo ó poliamida). Son poco utilizadas debido a que poseen alta resistencia eléctrica en disoluciones salinas diluídas y baja resistencia mecánica en su estado altamente hinchado. [6]

c) Según su Estructura Química

♦ **Perfluoradas:** Fueron inicialmente desarrolladas por DuPont y han tenido un amplio campo de aplicaciones debido a su gran resistencia química y mecánica. La mayor parte de las existentes en el mercado son catiónicas. Estas membranas fueron comercializadas bajo el nombre de Nafión y su estructura química se basa en un copolímero de tetrafluoroetileno y un éter vinílico perfluorado que porta un grupo terminal sulfónico. Asimismo, existen otras membranas perfluoradas como las Flemión de Asahi Glass, con grupos intercambiadores de iones débiles, en las que el grupo sulfónico se ha sustituido por un carboxilato (-COONa).

♦ **No perfluoradas:** Son las que más se utilizan a nivel industrial por su bajo costo, se encuentran fácilmente tanto en forma catiónica como aniónica y existe gran variedad de las mismas.



En la Tabla I.1 se pueden observar las propiedades más importantes de las membranas de intercambio iónico comerciales.

Tabla I.1. Propiedades de las membranas de intercambio iónico comerciales.

Membrana	Tipo	Propiedades de estructura	IEC, meq/g	Refuerzo	Espesor, mm	Gel agua, %	Resistencia superficial 0,5 N NaCl, 25° C, Ω·cm ²	Permselectividad 1,0/0,5 N KCl, %
Asahi Chemical Industry Company Ltd., Chiyoda-ku, Tokio, Japón								
K 101	Catiónica	Estireno/DVB	1,4	Sí	0,24	24	2,1	91
A 111	Aniónica	Estireno/DVB	1,2	Sí	0,21	31	2-3	45
Asahi Glass Company Ltd., Chiyoda-ku, Tokio, Japón								
CMV	Catiónica	Estireno	2,4	PVC	0,15	25	2,9	95
AMV	Aniónica	Butadieno	1,9	PVC	0,14	19	2-4,5	92
ASV	Aniónica	Univalente	2,1		0,15	24	2,1	91
DMV	Catiónica	Diálisis			0,15		—	—
Flemion*	Catiónica	Perfluorada						
Ionac Chemical Company, Sybron Corporation, Birmingham, NJ 08011, EE. UU.								
MC 3470	Catiónica		1,5	Tergal	0,6	35	6-10	68
MA 3475	Aniónica		1,4	Tergal	0,6	31	5-13	70
MC 3142	Catiónica		1,1		0,8		5-10	—
MA 3148	Aniónica		0,8	Tergal	0,8	18	12-70	85
Ionics Inc., Watertown, MA 02172, EE. UU.								
61AZL386	Catiónica		2,3	Modacrílico	0,5	46	~6	—
61AZL389	Catiónica		2,6	Modacrílico	1,2	48	—	—
61CZL386	Catiónica		2,7	Modacrílico	0,6	40	~9	—
103QZL386	Aniónica		2,1	Modacrílico	0,63	36	~6	—
103PZL386	Aniónica		1,6	Modacrílico	1,4	43	~21	—
204PZL386	Aniónica		1,9	Modacrílico	0,57	46	~8	—
204SXZL386	Aniónica		2,2	Modacrílico	0,5	46	~7	—
204U386	Aniónica		2,8	Modacrílico	0,57	36	~4	—
Du Pont Company, Wilmington, DE 19898, EE. UU.								
N 117	Catiónica	Perfluorada	0,9	No	0,2	16	1,5	—
N 901	Catiónica	Perfluorada	1,1	PTFE	0,4	5	3,8	96
Pall RAI, Inc., Hauppauge, NY 11788, EE. UU.								
R-5010-L	Catiónica	LDPE	1,5	PE	0,24	40	2-4	85
R-5010-H	Catiónica	LDPE	0,9	PE	0,24	20	8-12	95
R-5030-L	Aniónica	LDPE	1,0	PE	0,24	30	4-7	83
R-5030-H	Aniónica	LDPE	0,8	PE	0,24	20	11-16	87
R-1010	Catiónica	Perfluorada	1,2	No	0,1	20	0,2-0,4	86
R-1030	Aniónica	Perfluorada	1,0	No	0,1	10	0,7-1,5	81
Rhone-Poulenc Chemie GmbH, Frankfurt, Alemania								
CRP	Catiónica		2,6	Tergal	0,6	40	6,3	65
ARP	Aniónica		1,8	Tergal	0,5	34	6,9	79
Tokuyama Soda Company Ltd., Nishi-Shimbashi, Minato-ku, Tokyo 105, Japón								
CL-25T	Catiónica		2,0	PVC	0,18	31	2,9	81
ACH-45T	Aniónica		1,4	PVC	0,15	24	2,4	90
ACM	Aniónica	Bajo transporte H ⁺	1,5	PVC	0,12	15	4-5	—
AMH	Aniónica	Resistente químico	1,4	—	0,27	19	11-13	—
CMS	Catiónica	Univalente	>2,0	PVC	0,15	38	1,5-2,5	—
ACS	Aniónica	Univalente	>1,4	PVC	0,18	25	2-2,5	—
AFN	Aniónica	Antiensuciamiento	<3,5	PVC	0,15	45	0,4-1,5	—
AFX	Aniónica	Diálisis	1,5	PVC	0,14	25	1-1,5	—
Neosepta®-F		Perfluorada						



I.2.1.2.) Propiedades Fisicoquímicas de las Membranas de Intercambio Iónico

Las propiedades fisicoquímicas permiten definir el comportamiento de una membrana en equilibrio estático o dinámico con una solución de electrolito. Son las siguientes:

- ♦ **Capacidad de Intercambio:** Representa el número de grupos funcionales por unidad de masa de la membrana deshidratada y se expresa en *miliequivalentes por gramo de membrana seca*. Para poder comparar las capacidades de intercambio, éstas deben ser medidas bajo condiciones experimentales idénticas debido a que el acceso a los grupos funcionales puede depender del impedimento estérico del contraión. [7]

- ♦ **Hinchamiento:** La red macromolecular de las membranas de intercambio iónico es una red insoluble, pero con zonas en las cuales puede penetrar el solvente causando hinchamiento. La penetración de un solvente como el agua es favorecida por la presencia de grupos funcionales hidrófilos en la membrana. El hinchamiento se determina midiendo la cantidad de agua en la membrana definida como la *masa de agua por gramo de membrana seca*, expresada en porcentaje. [7]

- ♦ **Potencial y Exclusión de Donnan:** Ocurre cuando la membrana se sumerge en un electrolito de baja concentración y sin campo eléctrico, es decir, en régimen estático. Consideremos una membrana de intercambio catiónica en contacto con una solución diluida de un electrolito fuerte. Para asegurar la electroneutralidad de la membrana el número de cationes (en este caso los contraiones) al menos deben ser iguales al número de sitios funcionales de intercambio catiónico, por lo que la concentración de cationes dentro de la membrana es muy superior a la concentración en la solución, esto hace que aparezca una migración de los cationes de la membrana hacia la solución y de los aniones de la solución hacia la membrana. Como resultado se tiene una acumulación de cargas en la interfase membrana – solución, positiva del lado de la solución y negativa del lado de la membrana, lo que crea una diferencia de potencial eléctrico entre las dos fases, el cual es llamado *Potencial de Donnan*. Este potencial se opone a la difusión iónica a ambos lados de la membrana manteniendo los cationes dentro de la misma y a los aniones en la solución externa. La penetración del electrolito en la membrana



se encuentra entonces limitada o es prácticamente nula, lo que se conoce como *Exclusión de Donnan*. [7]

♦ **Permselectividad:** Esta propiedad define el comportamiento de una membrana de intercambio iónico y no es una constante característica de la misma porque depende de las condiciones experimentales. Una membrana idealmente permselectiva es permeable a los contraiones e impermeable a los coiones. La permselectividad a un ión dado se caracteriza por el *Número de Transporte* de ese ión a través de la membrana sometida a una diferencia de potencial, este número de transporte es igual a la fracción de corriente eléctrica transportada por ese ión como se muestra a continuación:

Ec. 1

$$t_j = \frac{I_j}{I} = \frac{F \times Z_j \times J_j}{I}$$

Donde:

t → Número de transporte

I → Intensidad de corriente eléctrica

F → Constante de Faraday

Z → Carga del ión

J → Flujo de materia

j → Subíndice que indica el ión

En la solución todos los iones participan en el transporte de corriente:

Ec. 2

$$t_{\text{catión}} + t_{\text{anión}} = 1$$

Entonces, en una membrana perfectamente permselectiva ocurre que:

Ec. 3

$$t_{\text{contraión}} = 1 \quad ; \quad t_{\text{coión}} = 0$$



La permselectividad de las membranas disminuye cuando la concentración de la solución externa crece. [7]

♦ **Resistencia Eléctrica:** Es muy importante que sea lo más baja posible con el objeto de minimizar el consumo de energía eléctrica. En una membrana de intercambio iónico, la conductividad se hace por medio del desplazamiento de los iones móviles, a saber, los contraiones cuando se trabaja a concentraciones bajas; pero también los coiones cuando se opera a altas concentraciones [7]. Esta resistencia depende de:

- La estructura de la membrana: tasa de reticulación y tasa de injerto.
- La concentración de la solución en la cual se sumerge la membrana.
- La naturaleza del electrolito: valencia y tamaño de los contraiones.

En general, lo que se determina es la *Resistencia de la Superficie de la Membrana*, como sigue:

Ec. 4

$$\Omega_m = \frac{\rho_m}{S}$$

Donde:

Ω_m → Resistencia de la membrana (Ω/cm^2)

ρ_m → Resistividad de la membrana por unidad de espesor para el área de la membrana ($\Omega*\text{cm}$)

S → Área de medida de la membrana (cm^2)

♦ **Resistencia Mecánica:** Las membranas deben tener una alta resistencia mecánica para evitar su ruptura como consecuencia de las fuerzas que deben soportar cuando son colocadas en los módulos. Tales fuerzas provienen de:

- De su manejo durante la instalación.
- De la tensión al instalarlas y alinearlas en el módulo.
- De las diferencias de presiones entre los compartimientos que ellas separan.



- Del hinchamiento y encogimiento cíclicos por cambios en la presión osmótica de las disoluciones debido a la variación de sus concentraciones. [4]

- ♦ **Resistencia Térmica:** Esta resistencia depende del polímero base y del material polimérico de refuerzo. Las membranas perfluoradas son estables hasta temperaturas de 90°C, mientras que las no perfluoradas, usadas con mayor frecuencia, no pueden trabajar a temperaturas superiores a los 60°C. [4]

- ♦ **Resistencia Química:** Es de vital importancia que esta resistencia sea elevada debido a que durante su funcionamiento están sometidas a distintos ambientes químicos:

- Cambios de pH.
- Ambiente oxidante y reductor: para los cuales deben comportarse como material inerte.
- Presencia de disolventes orgánicos.

La resistencia química de una membrana depende del polímero base en el que están anclados los grupos intercambiadores de iones. Las membranas perfluoradas de tipo Nafion poseen una gran resistencia química mientras que, las membranas no perfluoradas, son sensibles a los pH elevados de las soluciones con las que están en contacto. [4]

- ♦ **Permeabilidad a Moléculas Neutras:** Lamentablemente las membranas de intercambio iónico algunas veces son permeables a moléculas que no se encuentran ionizadas, éstas atraviesan a la membrana por difusión (sobre todo sin son de pequeño tamaño). Lo que se busca en una membrana es que este coeficiente de difusión sea nulo puesto que, de lo contrario se provocan problemas operacionales como:

- Disminución de la eficacia de la corriente en un proceso en el que se desee separar una sal de una sustancia neutra.
- Disminución de la capacidad de concentración: Por citar un ejemplo, si junto con los iones a transportar desde el compartimiento de diluido al concentrado



difunde una gran cantidad de agua, la concentración final disminuirá y así, habrá un malgaste de la corriente eléctrica. [4]

Para la escogencia de una membrana de intercambio iónico se debe tener en cuenta que debe haber una distribución uniforme de sus propiedades a lo largo de toda su área para lograr una buena separación. Otra consideración que debe tenerse es la Relación Costo/Vida Media de la membrana la cual debe ser lo más baja posible.

I.2.2.) Limitaciones de la Electrodiálisis

En la Electrodiálisis, la transferencia de iones trae consigo una cantidad de fenómenos secundarios que perturban y disminuyen la eficacia de esta técnica, es decir, que disminuyen el rendimiento del transporte y causan un consumo de energía, éstos son:

♦ **Polarización por Concentración:** Es el límite que se encuentra cuando se quiere aumentar el flujo de iones a través de la membrana y se debe a la variación del número de transporte del contra-ión entre la solución y la membrana. Este fenómeno se observa en la Figura I.13.

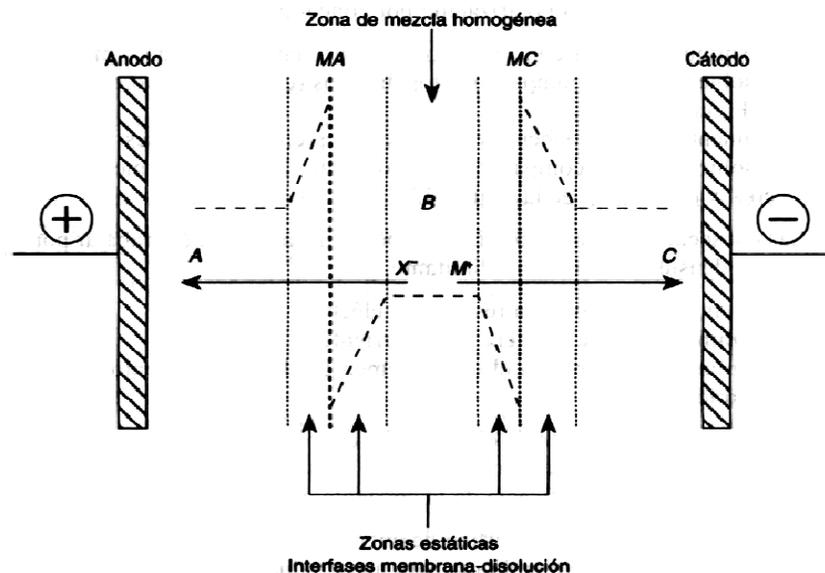


Figura I.13. Gradientes de concentración en interfases solución – membrana.



Por el compartimiento central (B) se alimenta una disolución acuosa de una sal (XM). En esta zona la concentración de la solución es homogénea, sin embargo, conforme las líneas de flujo se aproximan a las interfases solución – membrana la velocidad lineal de la disolución disminuye, de tal forma que en las proximidades de las membranas existen unas zonas en donde no hay mezcla (Zonas Estáticas).

Al aplicar una diferencia de potencial entre los electrodos, los aniones (X⁻) migran desde B hacia A a través de la membrana de intercambio aniónico (MA), mientras que los cationes (M⁺) migran hacia C a través de la membrana de intercambio catiónico (MC). Como consecuencia en las zonas estáticas disminuye la concentración del ión que es transportado con respecto a la de la disolución. Para compensar esa disminución, los iones de la zona de mezcla homogénea migran hacia las zonas estáticas por difusión. Mientras la velocidad de difusión sea igual a la velocidad de migración de los iones a través de la membrana (impuesta por la corriente eléctrica), se alcanzará una situación de equilibrio.

Sin embargo, si la velocidad de migración a través de las membranas (determinada por la densidad de corriente aplicada), excede a la de difusión, la concentración de iones en las zonas estáticas comenzará a disminuir hasta aproximarse a cero. Es en este momento que ocurre la polarización por concentración y la densidad de corriente en la cual ocurre este fenómeno se denomina *Corriente Límite*.

Si se sobrepasa el valor de la corriente límite, los contraiones necesarios para el transporte dentro de la membrana deben ser generados en la interfase membrana – solución por un mecanismo distinto al de la difusión que es la disociación del solvente, en el caso del agua, ocurre la hidrólisis, obteniendo iones H⁺ y OH⁻ que compiten con las especies a separar y producen variaciones locales del pH, puesto que los iones OH⁻ son transportados a través de la membrana de intercambio aniónico pero no así los iones H⁺ a través de la membrana de intercambio catiónico, el cual es un comportamiento anómalo. Lo anteriormente expuesto trae consecuencias negativas en la electrodiálisis:



- Las capas de difusión de baja concentración aumentan la resistencia eléctrica de las membranas y, por ende, el consumo de energía.
- El transporte de los iones H^+ y OH^- disminuye el rendimiento farádico.
- Las variaciones locales de pH pueden afectar negativamente la resistencia mecánica de las membranas, pueden taponarlas por precipitación de hidróxidos y producir la ionización de las especies a separar.

Para evitar todos estos problemas, en la electrodiálisis se debe operar todo el tiempo por debajo de la corriente límite. La densidad de corriente límite viene dada por la siguiente expresión:

Ec. 5

$$\frac{I_{\text{lim}}}{C_d} = \frac{D \times F}{(\delta \times (t_m - t_d))}$$

Donde:

I_{lim} → Corriente Límite ($A \cdot cm^2$)

C_d → Concentración de la sal (Eq/cm^3)

F → Constante de Faraday (96.500 Coul/Eq)

D → Coeficiente de difusión de la sal (cm^2/s)

δ → Espesor de la interfase membrana – disolución (cm)

t_m → Número de transporte del ión en la membrana

t_d → Número de transporte del ión en la disolución

A grandes rasgos, puede afirmarse que el número de transporte del ión en la disolución (t_d) es transportada por los aniones y la otra mitad por los cationes y, si además se supone que la selectividad de las membranas es de 100%, el número de transporte del ión en la membrana (t_m) será la unidad, por lo que la ecuación anterior queda así:

Ec. 6

$$\frac{I_{\text{lim}}}{C_d} = \frac{D \times F}{\delta}$$



De donde se deduce que el aumento de la densidad de corriente requiere disminuir el espesor de la interfase solución – membrana, mediante el aumento de la velocidad de alimentación de la disolución, ó aumentar la concentración de la solución de alimentación. [4]

♦ **Taponamiento de las Membranas:** Durante una transferencia iónica prolongada a través de las membranas de intercambio iónico, otros fenómenos de polarización pueden producirse, lo que reduce la eficiencia de la electrodiálisis, en lo referente a un decrecimiento del rendimiento y un aumento de la resistencia eléctrica y, también provoca una alteración irreversible de las membranas, a esto se refiere el taponamiento. Existen tres tipos de taponamiento:

- *El Ensuciamiento*, provocado por el depósito de geles de coloides o de lechos de macromoléculas sobre la superficie de la membrana.
- *La Incrustación* después de una precipitación de electrolitos minerales en las membranas, como carbonatos o hidroxilos.
- *El Envenenamiento*, debido a la penetración irreversible de iones orgánicos voluminosos o lipófilos.

Para luchar contra estos efectos de contaminación secundaria existen varios medios:

- Tratamiento de las membranas mediante un ciclo de lavado adecuado.
- Inversión periódica de la corriente eléctrica e igualmente inversión de los circuitos hidráulicos.
- Utilización de membranas especiales (membranas antifouling). [6]

♦ **Trasporte de Agua:** En las experiencias de electrodiálisis puede producirse un transporte de agua debido a diversos factores:

- El fenómeno de ósmosis que se produce cuando la diferencia de concentración entre los compartimientos de soluciones diluidas y concentradas es grande.
- El fenómeno de electro ósmosis que aparece cuando hay un arrastre de agua debido a la fricción entre las moléculas de agua y los iones móviles.
- El fenómeno de solvatación de los iones, debido a que ellos viajan llevando consigo moléculas de agua de hidratación. [5]



♦ **Fuga de Protones a través de las Membranas Aniónicas:** Se trata de la pérdida de selectividad de las membranas de intercambio aniónico en un medio ácido concentrado y que se debe a la gran movilidad de los protones (coiones) dentro de la membrana cuando se sobrepasan las condiciones de exclusión de Donnan. Este efecto disminuye considerablemente la eficacia de la electrodiálisis en la reconcentración de ácidos. [6]

I.2.3.) Componentes de un Módulo de Electrodiálisis

Los componentes básicos de un módulo de electrodiálisis son:

♦ **Electrodos:** Son materiales conductores de la electricidad, a través de los cuales se verifica la transferencia electrónica con la disolución en la que se encuentran las sustancias cuya transformación se desea. En electrodiálisis, su función se limita a la de proporcionar el campo eléctrico necesario para que se produzca el proceso. Por esta razón, se escogen con base a criterios económicos y de estabilidad. Los más utilizados son:

- DSAs y Pt/Ti como ánodos.
- Acero Inoxidable como cátodo.
- Grafito, Pt/Ti y niobio platinizado en Electrodiálisis reversible. [4]

♦ **Membranas:** De las membranas de intercambio iónico se ha hablado con anterioridad, en esta sección basta con recordar que los criterios más importantes para la escogencia de una membrana en electrodiálisis es que las mismas deben poseer alta permselectividad y baja resistencia eléctrica; con la excepción de las membranas situadas en los compartimientos electródicos las cuales deben poseer alta resistencia química, debido a que están expuesta a un ambiente mucho más agresivo que el resto de las membranas. [4]

♦ **Espaciadores:** Son materiales plásticos en forma de malla que se colocan entre cada par de membranas. Sus funciones son las siguientes:



- Proporcionar los canales de flujo a través de los que fluyen las disoluciones.
- Actuar como promotores de turbulencia y controlar la distribución de flujo.
- Sella las celdas.
- Soportar las membranas.

Los espaciadores o separadores deben diseñarse de tal forma que permitan el flujo de las disoluciones a través de los compartimientos del módulo sin una elevada pérdida de carga, que daría lugar a un incremento del consumo energético asociado al bombeo de las disoluciones y, a la vez, faciliten el transporte de materia disolución – membrana – disolución con el objeto de incrementar en lo posible la densidad de corriente límite, teniendo en cuenta siempre que la distancia entre membranas debe ser lo más pequeña posible; en los módulos industriales esta distancia está comprendida entre 0,4mm y 2mm.

En la actualidad existen dos tipos básicos de separadores (Figura I.14) que se diferencian en base al recorrido que la disolución realiza por el interior de los compartimientos del módulo:

- **Separador de Flujo Tortuoso (*tortuous path*):** El espaciador forma un solo conjunto con la junta y está diseñado para obligar a la disolución a recorrer un largo camino serpenteante entre la entrada y salida, a través de unos canales que contienen bandas cruzadas para facilitar el flujo turbulento. El objetivo es proporcionar un elevado tiempo de residencia con objeto de incrementar el porcentaje de desalinización del proceso; pero un tal recorrido del flujo implica pérdidas de cargas notables y necesita en el punto de entrada una presión del orden de los 5 bares.
- **Separador de Flujo Laminar (*sheet flow*):** Son los módulos más utilizados por la mayoría de los fabricantes. El sellado de los compartimientos se logra gracias a una junta externa, mientras que una malla de plástico interna se usa como espaciador e impide el contacto de las membranas. La disolución fluye directamente entre la entrada y la salida, ambas situadas sobre la junta pero en lados opuestos. El consumo energético asociado al bombeo es menor que en el flujo tortuoso y la caída de presión hidráulica está comprendida entre 1bar y 2 bares. [4]

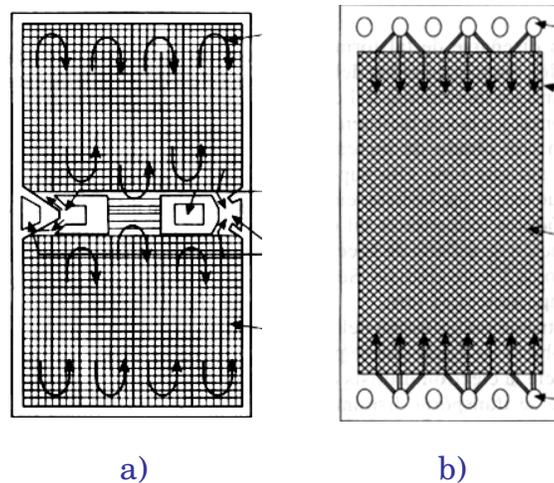


Figura I.14. Tipos de Espaciadores. a) Flujo Tortuoso. b) Flujo Laminar.

♦ **Juntas:** Las juntas deben poseer alta resistencia química y mecánica y, es de gran interés que ambas propiedades se cubran con el menor espesor posible, pues de esta manera se disminuye la distancia entre membranas y con ello el consumo de energía. Las juntas cumplen dos objetivos principales:

- Evitar fugas de electrolito en la celda, ya que es fuente importante de problemas como cortocircuitos.
- Evitar la mezcla de las corrientes que fluyen por los compartimientos concentrados y diluidos. [4]

I.2.4.) Configuraciones de Celda

Como se dijo anteriormente, un módulo de Electrodiálisis está conformado por un conjunto de celdas unitarias apiladas entre dos electrodos en una configuración similar a la de un filtro prensa. Existen tres tipos de configuraciones de celda, cada una de las cuales se caracteriza por el número de corrientes acuosas diferentes que se alimentan y que salen del módulo. Las corrientes acuosas se consideran diferentes cuando difieren en la naturaleza de sus componentes o en la concentración de los mismos. Las configuraciones son las que siguen:

♦ **Celdas de Dos Compartimientos:** Una celda de dos compartimientos posee la siguiente configuración (Figura I.11):



- Una membrana de intercambio aniónico
- Una junta y espaciador
- Una membrana de intercambio catiónico
- Una junta y espaciador

Esta configuración es la más usada y se aplican fundamentalmente en desalación, concentración, separación de especies iónicas y neutras y, separación de iones de cargas diferentes.

♦ **Celdas de Tres Compartimientos:** La configuración de las membranas da lugar a la existencia de tres circuitos de alimentación. En la Figura I.15 se muestra una celda de tres compartimientos empleada para la acidificación de la leche, existen dos tipos:

- Dos membranas catiónicas y una aniónica
- Dos membranas aniónicas y una catiónica

Su funcionamiento es análogo al del proceso de doble descomposición (que se describirá más adelante) y se utiliza cuando es suficiente una reacción parcial de doble descomposición, como en la acidificación de una disolución ó; cuando no es posible llevar a cabo una reacción de doble descomposición porque uno de los iones no puede ser transferido a través de la membrana como en la neutralización de una disolución de ácido orgánico, por ejemplo.

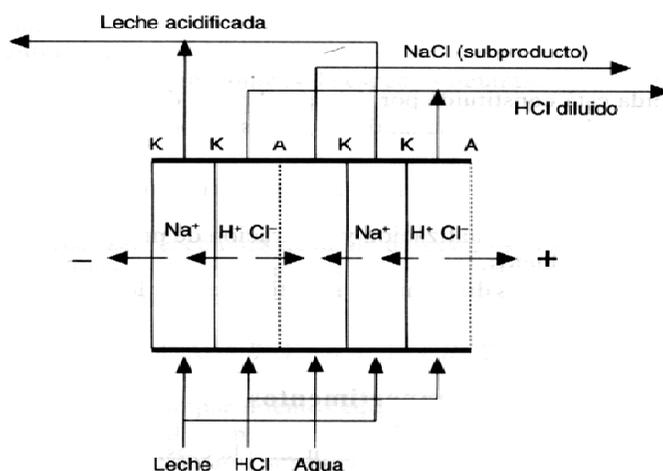


Figura I.15. Celda de tres compartimientos.



♦ **Celdas de Cuatro Compartimientos:** Este tipo de celda se utiliza para realizar reacciones de doble descomposición, proceso en el cual la combinación iónica de dos compuestos se modifica para producir dos compuestos nuevos según el siguiente esquema:



Una celda de cuatro compartimientos equivale a dos celdas de dos compartimientos de tal forma que el módulo de electrodiálisis dispone de cuatro circuitos de alimentación separados (Figura I.16), a saber, los de diluidos (D_1 y D_2) y los de concentrados (C_1 y C_2). Bajo la acción de un campo eléctrico continuo los cationes A^+ migran desde D_2 a C_2 , donde quedan atrapados, mientras que los aniones Y^- migran desde D_1 a C_2 donde igualmente quedan atrapados. En consecuencia, en el compartimiento C_2 se produce el compuesto A^+Y^- , mientras que en el C_1 se produce B^+X^- .

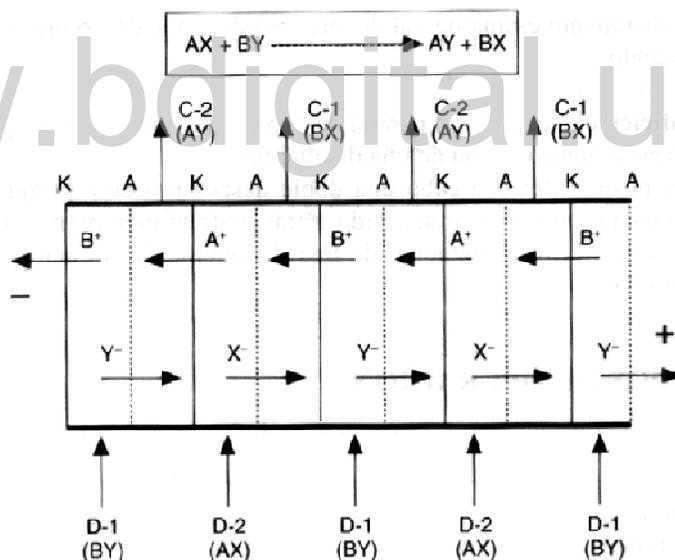


Figura I.16. Celda de cuatro compartimientos.

Cada celda está constituida por dos membranas de intercambio catiónico y dos membranas de intercambio aniónico, con sus correspondientes juntas y espaciadores. Esta configuración se utiliza para evitar etapas de cristalización y separación de productos de reacción, para purificar productos ó para obtener productos difícilmente sintetizables por los procedimientos convencionales.



I.2.5.) Modos de Operación

Son los que se muestran a continuación:

♦ **Continuo:** En este modo de operación, la solución a tratar atraviesa el módulo sólo una vez. Para alcanzar la concentración deseada, frecuentemente es necesario disponer de varios módulos en serie y varias líneas de módulos en paralelo, sobre todo cuando hay que tratar grandes cantidades (Figura I.17). Este tipo de montaje es en general usado para el desalado de agua potable. ^[6]

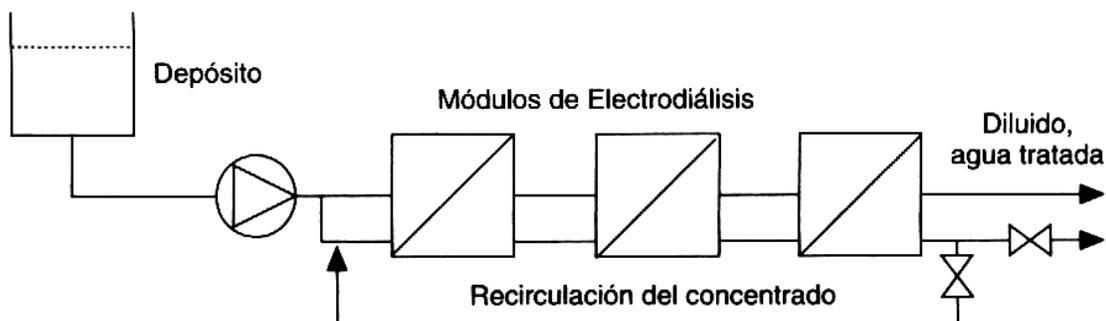


Figura I.17. Proceso Continuo.

♦ **Discontinuo:** En este modo de operación, el agua a tratar se recicla continuamente dentro del módulo. El reciclaje de las soluciones en el módulo se efectúa durante el tiempo necesario para alcanzar exactamente las concentraciones deseadas, las cuales varían linealmente con el tiempo hasta un nivel de concentración constante. El tiempo necesario depende del volumen y de las concentraciones iniciales y finales de la solución a tratar y también de la eficacia del arreglo de celdas (Figura I.18). Este tipo de arreglo se utiliza en este trabajo.

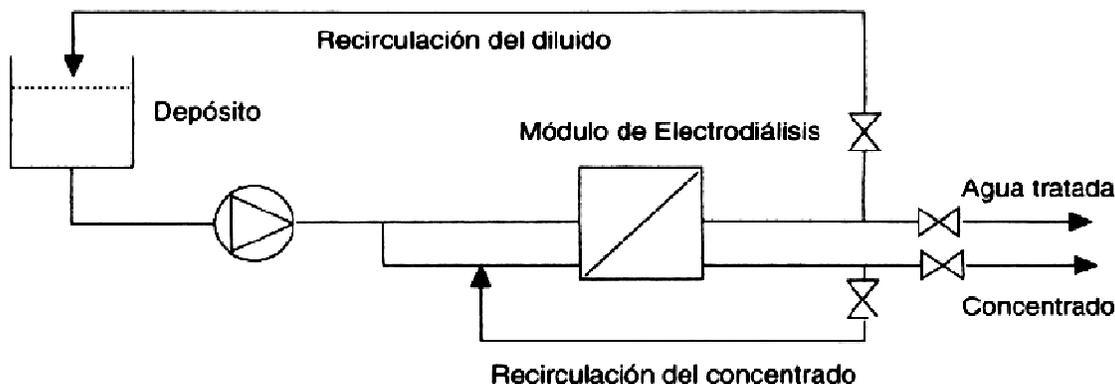


Figura I.18. Proceso Discontinuo o de Recirculación Total.



Este proceso presenta la ventaja de tratar soluciones de cualquier concentración sin generar gastos de instalación demasiado elevados; por ejemplo, cuando la solución está fuertemente concentrada, su tratamiento por el sistema continuo necesitaría numerosas líneas de módulos, mientras que aquí es suficiente un modulo único. En general, este proceso es utilizado en las industrias agroalimentarias y también para el tratamiento de líquidos de origen biológico, pues las cantidades a tratar no son muy elevadas. [6]

♦ **Semicontinuo:** Este proceso consiste en asegurar una alimentación continua de soluciones a tratar y de recuperar en continuo una parte de la producción (Figura I.19).

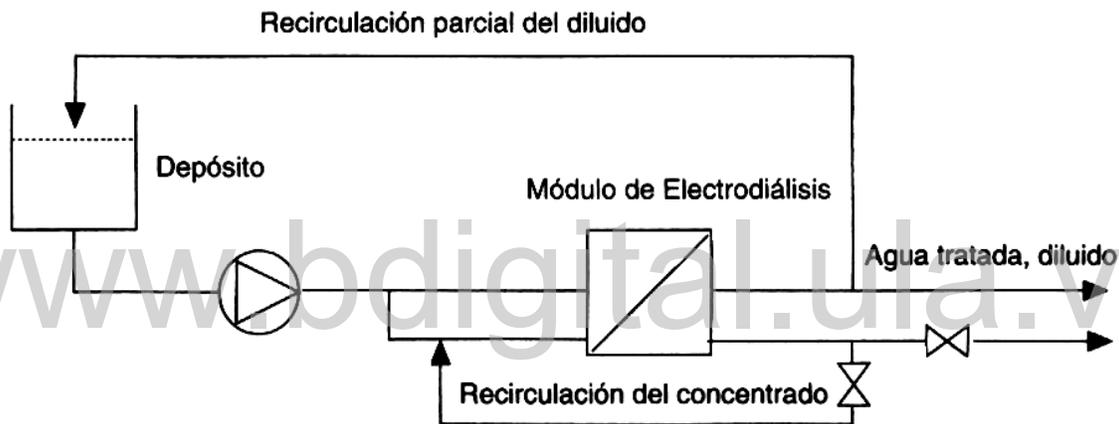


Figura I.19. Proceso Semicontinuo o de Recirculación Parcial.

Las concentraciones de salida se ajustan arreglando los caudales de entrada y por la densidad de corriente mientras un simple vertedero permite la salida de la producción. Este proceso es poco utilizado industrialmente en desmineralización a causa de su excesivo consumo eléctrico si se compara con los otros dos modos de operación. En efecto, el reciclaje hace funcionar el aparato con una concentración más baja que la de la solución de alimentación, lo que se traduce en un aumento de la resistencia eléctrica y una disminución de la corriente límite. [6]



I.2.6.) Aplicaciones

En la actualidad son numerosos los procesos en los que se requiere el empleo de la Electrodiálisis, las tres aplicaciones más ampliamente utilizadas son las que se describen a continuación:

- ♦ **Potabilización de Aguas:** La Electrodiálisis compite con la Ósmosis Inversa y la Evaporación Súbita en múltiples etapas en los procesos de desalación de aguas con el objeto de obtener aguas potables y aguas para usos industriales, tales como, aguas para torres de refrigeración y alimentación de calderas. Desde el punto de vista económico, la tecnología más adecuada depende del contenido en sales del agua a tratar. Para aguas salobres con un contenido en sales inferior a 5g/L, la electrodiálisis es la tecnología más económica, utilizándose actualmente para obtener aguas potables y como etapa de tratamiento previo al intercambio iónico, minimizando así los costos de regeneración de las resinas y los vertidos ácidos y básicos que dicha regeneración origina. [4]

- ♦ **Producción de Sal de Mesa a partir de Agua de Mar:** En Japón, la sal de mesa se fabrica utilizando la técnica de electrodiálisis por consideraciones económicas locales. La producción anual estimada es superior a las 350.000 toneladas, que exigen más de 500.000m² de área de membrana. Esta tecnología se utiliza como etapa previa a la evaporación para concentrar el agua de mar hasta 200g/L. La operación se lleva a cabo en una celda de dos compartimientos dotada de membranas selectivas a los iones monovalentes para evitar que los iones divalentes (Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻) migren al compartimiento concentrado impurificando el producto. Los líderes en este campo son obviamente empresas Japonesas como *TOCUYAMA SODA, ASAHI GLASS, ASAHI CHEMICAL*. [4]

- ♦ **Desmineralización del Lactosuero:** El suero posee un alto contenido de materia orgánica, por lo cual su carga contaminante es muy elevada (DQO entre 40.000mg/L y 50.000mg/L). Sin embargo, el suero tiene una serie de propiedades que lo convierten en una materia prima única en la producción de leche para la alimentación infantil. Su relación de proteínas β-lactoglobulina y lactoalbúmina a caseína (60:40) es muy similar a la de leche materna, contiene azúcar de leche (lactosa) y una concentración adecuada de minerales esenciales (fósforo y calcio). A pesar de ello, su alta concentración en sales minerales totales impide su empleo directo en la fabricación de leche infantil. Mediante un módulo de electrodiálisis de



celdas de dos compartimientos es posible desmineralizarlo, revalorizando así un efluente con una elevada carga contaminante. [4]

Sin embargo, existen otras aplicaciones de la Electrodiálisis:

♦ **Industria Metalúrgica:** La Electrodiálisis es utilizada en la recuperación de los iones metálicos presentes dentro de las aguas de enjuagues de los talleres de galvanoplastia, así como también para la producción y recuperación de ácidos en los efluentes industriales. [6]

♦ **Tratamiento con Electrodiálisis a Membranas Bipolares:** Se tratan las sales de hidrogenosulfito de sodio y mezclas de sales compuestas por sal de nitrato y fluoruro de sodio, para lograr la regeneración de los ácidos y bases correspondientes. [6]

♦ **Industria Agro – Alimentaria:** Se emplea la electrodiálisis en procesos como la desacidificación de soluciones de azúcar, de sirope, de jugos de frutas; la desmineralización de residuo de uvas antes de su reconcentración y, la estabilización tártrica de vinos por la eliminación del tartrato de potasio. [6]

♦ **Bio – Industria:** Esta técnica se emplea en la desmineralización de soluciones que contienen biomoléculas tales como los aminoácidos, los péptidos, las proteínas; la extracción de pequeñas moléculas biológicas que llevan cargas eléctricas tales como los aminoácidos y también, para extraer productos terminados de alto valor añadido, acoplado con la ultrafiltración. [6]

♦ **Efluentes Industriales:** La electrodiálisis es de gran utilidad en los procesos industriales, en lo que a minimización de del impacto ambiental se refiere, disminuyendo así los costos de materias primas y tratamiento de efluentes. Algunos ejemplos son:

- Recuperación y reciclaje de sales de cromo.
- Concentración de ácidos minerales.
- Recuperación de materias primas contenidas en baños de galvanizado. [4]



CAPÍTULO II. EL AGUA

El agua es el compuesto más abundante que hay en el planeta y uno de los más importantes. En la antigüedad fue tan apreciada que los filósofos decidieron incluirla dentro de la clasificación de los elementos fundamentales, junto con el aire, la tierra y el fuego. ^[9]

El agua es el elemento fundamental, es la fuente vida de todos los seres vivos dado que se encuentra como integrante de todos los tejidos animales y vegetales siendo necesaria como vehículo para el proceso de todas las funciones orgánicas; además, el agua es indispensable para toda una serie de usos humanos, desde alimento para gozar de una buena salud hasta como fuente de energía en las industrias.

Sin embargo, ninguna muestra de agua es completamente pura debido a que la misma se encuentra naturalmente contaminada como consecuencia del ciclo hidrológico en donde puede absorber, arrastrar y disolver gases, minerales y una gran cantidad de contaminantes.

La superficie terrestre está compuesta por agua en un 70% y de este total, la gran mayoría se encuentra en los océanos y, por ende, la mayor parte del agua disponible en el planeta se encuentra como agua salada. El agua dulce se encuentra en los casquetes polares, en acuíferos subterráneos y aguas superficiales constituyendo los ríos y lagos, estas últimas son las que finalmente aprovecha el hombre para sus necesidades. La disponibilidad del agua disminuye cada vez debido al incremento de la población humana y a la contaminación de los cursos de agua por el vertido de desechos urbanos, industriales y agrícolas. ^[10]

II.1.) Contaminación del Agua

La contaminación del agua es un factor preocupante en estos tiempos puesto cada día la demanda de agua crece y simultáneamente las fuentes de agua dulce natural disminuyen como consecuencia del vertido de desechos a los ríos, lagos y



mares. Un curso de agua se considera contaminado cuando la composición o estado de sus aguas es modificado, directa o indirectamente por la actividad del hombre de una manera tal que dicha agua deja ser utilizada para los fines a que estaba destinada en su estado natural.

Algunos de los efectos que se producen debido a la contaminación del agua son:

- Destrucción de los recursos hidráulicos limitados.
- Disminución de la calidad del agua para el abastecimiento de poblaciones o para usos industriales o agrícolas.
- Disminución del poder autodepurador de las corrientes de agua receptoras, lo que trae como consecuencia la destrucción de la flora y de la fauna.
- Es un peligro potencial que afecta la salud pública influyendo esto en la economía de la sociedad.

Por las razones antes expuestas, la importancia del tratamiento de las aguas aumenta rápidamente. ^[11]

II.2.) Aguas residuales

Las aguas residuales son todas aquellas aguas que proceden del empleo de un agua natural. A continuación se da una breve descripción de varios aspectos referentes a las aguas residuales.

II.2.1) Tipos de Aguas Residuales

Las aguas residuales pueden proceder de varios sectores, como se muestra a continuación:

a) Desechos Líquidos Municipales

Estos desechos son originados en ciudades pueblos y comercios. La composición de estas aguas varía de un lugar a otro debido a las diferencias en



los hábitos alimenticios de las personas, el poder adquisitivo de la población y los cambios climatológicos. En general estas aguas poseen alto contenido de sulfatos, nitrógeno, cloruros, fósforo, sólidos suspendidos y materia orgánica biodegradable. La concentración de oxígeno disuelto en estas aguas es baja dado que la materia orgánica se descompone por la acción de microorganismos presentes en el agua consumiendo el oxígeno disuelto. ^[12]

b) Desechos Líquidos Agroindustriales:

Estos desechos provienen del procesamiento de los alimentos (cosechas) y de la industria pecuaria. Estas aguas contienen sobre todo nitrógeno, fósforo, sólidos suspendidos y materia orgánicas biodegradable. ^[12]

c) Desechos Líquidos Industriales:

Estos desechos se deben a los distintos usos del agua en las industrias y sus características son muy variadas debido a que dependen del tipo de industria de donde provenga y del tamaño de la misma, algunas características de ellas se describen a continuación:

- **Industria Agroalimentaria:** Los efluentes de este tipo de industria son esencialmente orgánicos y biodegradables con tendencia a una rápida acidificación y fermentación, tal es el caso de industrias como granjas, mataderos y centrales lecheras, entre otras.
- **Industria Textil:** Esta industria es muy diversa y las características de sus efluentes dependen del tipo de actividad de la misma. En general, contienen sólidos en suspensión, grasas, sales orgánicas, tintes y colorantes.
- **Industria Papelera:** Por lo general en este tipo de industrias se tiene tres tipos de efluentes: los procedentes del blanqueo, los procedentes del lavado y el condensado de los procesos de evaporación. Se caracterizan por un alto caudal y por un gran contenido de sólidos insolubles (fibras, carbonatos), alta DBO y DQO, color prominente y resistente a procesos biológicos.
- **Industria del Petróleo:** Los efluentes generados son muy diversos y presentan las siguientes características: presencia de sosa, sulfuros, fenoles,



compuestos orgánicos disueltos, parafinas, furfural, metiletilcetona, ácidos orgánicos, alcoholes pesados, benceno, cianuros, acetonitrilos, entre otros.

- **Industria de la Automoción:** Dependiendo de los procesos de fabricación se producirán efluentes con distinta composición y características. Pero en general, este tipo de aguas presentan metales pesados como plomo, cromo, detergentes, grasas y sólidos en suspensión.
- **Industria Metalúrgica:** Incluye la industria del aluminio, del ro, uranio y zinc. Los contaminantes más habituales, dependiendo del proceso son: carbono, fluoruros, grasas, metales, sosa, cianuros y disolventes.
- **Industria Química:** se incluyen sectores muy diferentes entre los que cabe destacar.

Industria del cloro: cuyo contaminante más importante es esencialmente mercurio.

Industria del amoníaco: contaminación por metanol y carbonato amónico.

Úrea: presencia de úrea y amonio.

Superfosfatos: que genera efluentes muy ácidos, sílice, fosfato cálcico, fluoruro cálcico y ácido fosfórico.

Farmacéutica: frecuentemente presentan disolventes orgánicos, antibióticos y biocidas.

Tintes: cuyos efluentes presentan disolventes clorados, nitrofenol, anilinas, detergentes, boratos, tripolifosfatos, alcoholes grasos y sulfatos. [13]

II.2.2) Características de las Aguas Residuales

Para llevar a cabo el tratamiento de las aguas deben conocerse sus características, las cuales definitivamente varían de un lado a otro, estas características pueden clasificarse en tres grupos, descritos a continuación:

II.2.2.1.) Características Físicas

Las principales características físicas de las aguas residuales son su contenido de sólidos, su temperatura, turbidez, color y olor, a continuación se define cada uno de estos aspectos:



♦ **Contenido de Sólidos:** los sólidos pueden encontrarse suspendidos o disueltos en el agua. En esta prueba se hace la separación del material suspendido con un filtro #40 y además se cuantifica el material que puede evaporarse. [12]

♦ **Temperatura:** la temperatura del agua residual es por lo general mayor a la del agua para el abastecimiento, como consecuencia del vertido de agua caliente proveniente del uso doméstico e industrial. La temperatura varía de estación en estación y también con la ubicación geográfica. La temperatura del agua es un parámetro muy importante porque afecta directamente las reacciones químicas y velocidades de reacción y hasta puede llegar a cambiar la vida acuática en el agua receptora. [14]

♦ **Turbidez:** es una medida de las propiedades de dispersión de la luz de las aguas y es un parámetro utilizado para indicar la calidad de las aguas residuales en relación al material residual en suspensión coloidal. El material coloidal impide la transmisión de la luz, ya que la absorbe o la dispersa. [14]

♦ **Color:** el color en las aguas residuales es causado por los sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución. El color causado por los sólidos suspendidos se llama *color aparente* mientras que el color causado por sustancias disueltas y coloidales se denomina *color verdadero* y se obtiene sobre una muestra filtrada. [14]

♦ **Olor:** el olor de un agua residual fresca es, por lo general, de baja toxicidad pero se libera una gran variedad de compuestos malolientes cuando se produce la degradación biológica bajo condiciones anaerobias de las aguas residuales. El principal compuesto de olor indeseable es el sulfuro de hidrógeno. [14]

II.2.2.2.) Características Químicas

Los constituyentes químicos de las agua residuales son muy variados y pueden dividirse en dos grupos, constituyentes orgánicos e inorgánicos. Entre los constituyentes inorgánicos se tienen elementos individuales como calcio, cloruro, hierro, cromo, zinc y variedad de compuestos como nitratos, sulfatos; entre los constituyentes inorgánicos encontramos constituyente no metálicos, metálicos y gases. Las principales características químicas del agua se describen a continuación:



♦ **El pH:** el intervalo adecuado de pH para la existencia de la mayor parte de la vida biológica es relativamente estrecho, en general entre pH 5 y 9, las aguas residuales con pH fuera de este rango son de difícil tratamiento mediante procesos biológicos. [14]

♦ **Nutrientes:** dado que el nitrógeno y el fósforo son esenciales para el crecimiento biológico, son considerados como nutrientes o bioestimulantes. El nitrógeno es esencial para la síntesis de proteínas por lo que, cuando la concentración de nitrógeno es insuficiente será necesario adicionarlo al agua que se está tratando y, el fósforo es muy importante en el crecimiento de las algas marinas, sin embargo, deberá controlarse este contenido para evitar el crecimiento incontrolado de las algas superficiales. [14]

♦ **Cloruros:** la concentración de cloruros en aguas residuales es un parámetro importante relacionado con su reutilización. Los cloruros en estas aguas provienen de los cloruros lixiviados en las rocas y los suelos con los que ellas hacen contacto. [14]

♦ **Gases Disueltos:** la determinación de gases disueltos tales como amoníaco, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, metano y oxígeno, se realiza para ayudar en la operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales. Las mediciones de oxígeno disuelto y amoníaco se realizan para controlar los procesos de tratamiento aerobio. La presencia de sulfuro de hidrógeno no sólo por ser un gas tóxico y de mal olor, sino porque su formación puede causar corrosión. Las mediciones de metano, dióxido de carbono y amoníaco se realizan junto con la operación de digestores anaerobios. [14]

♦ **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** se define como la cantidad de oxígeno en mg/L que hace falta para descomponer las materias orgánicas de un agua contaminada, por acción bioquímica aerobia. Esta demanda de oxígeno la ejercen tres clases de sustancias: carbonatadas, nitrogenadas y ciertos compuestos químicos reductores. Para completarse la oxidación biológica se requiere un tiempo de 21 a 28 días (DBO₂₁ y DBO₂₈), denominado como DBO último; pero este parámetro exige un tiempo muy largo, razón por la cual ha sido reemplazado por el DBO₅, es decir, la cantidad de oxígeno consumida luego de cinco días de incubación. [15]

♦ **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** la prueba DQO es usada para medir el material orgánico presente en las aguas residuales, susceptible de ser oxidado químicamente con una solución de dicromato de potasio en medio ácido. La



ventaja principal de la prueba DQO es que puede completarse en dos horas y media, lo cual es un tiempo bastante rápido si se compara con la prueba DBO₅, en la que deben esperarse 5 días.^[14]

II.2.2.3.) Características Biológicas

Las características biológicas de las aguas residuales son de fundamental importancia en el control de las enfermedades causadas por microorganismos patógenos de origen humano, y por el papel activo y fundamental de las bacterias y otros microorganismos dentro de la descomposición y estabilización de la materia orgánica, bien sea en el medio natural o en plantas de tratamiento de aguas residuales.

II.2.3) Tratamiento de las Aguas Residuales

El tratamiento de las aguas residuales involucra procesos de separación cuyo propósito es remover contaminantes físicos, químicos y biológicos introducidos en las corrientes de agua por el hombre, para dejarla limpia o en condiciones de que sea reutilizable. Los tratamientos a que se somete el agua son:

- ♦ **Tratamiento Primario:** como se dijo anteriormente el agua residual, por lo general, contiene sólidos en suspensión de diferentes tamaños. El tratamiento primario comprende una serie de operaciones de carácter mecánico, físico o fisico-químico, exigidas por la naturaleza y procedencia del agua residual, que se realizan con el objetivo de separar la mayor cantidad posible de sustancias que pueden crear problemas en las otras etapas de tratamiento por causa de su tamaño. Las principales operaciones realizadas en este tratamiento son clarificación, filtrado y ablandamiento.^[15]

- ♦ **Tratamiento Secundario:** el tratamiento secundario se refiere a un tratamiento biológico en el cual intervienen microorganismos capaces de degradar la materia orgánica contenida en el agua en elementos que no son contaminantes como CO₂ y H₂O. Principalmente se utilizan en esta etapa lechos bacterianos y lodos activados.^[15]



♦ **Tratamiento Terciario:** cuando las aguas deben volver a utilizarse o cuando los efluentes de los tratamientos anteriores pudiesen alterar el equilibrio biológico de corrientes de agua, debe emplearse una tercera etapa de tratamiento, en la cual se mejoran las características del agua tratada. En esta etapa se emplean microtamices, filtros de arena, coagulación, cloración y carbón activado además de emplear otros métodos químicos y biológicos para eliminar los nitratos y fosfatos. ^[15]

II.3.) La Electrodialisis en el Tratamiento de Agua Residuales

La electrodialisis es un proceso de separación que utiliza membranas de intercambio iónico y una diferencia de potencial eléctrico, para separar iones contenidos en una solución acuosa, como se explicó en el capítulo anterior.

En el pasado, la mayoría de plantas de electrodialisis trataron aguas salobres con contenido de sólidos totales disueltos desde 1000 hasta 10000 mg/L y obtuvieron un agua producto para servicios industriales de 200 a 500 mg/L de los mismos, aunque el proceso era muy costoso. Sin embargo, los costos de capital y los costos de construcción han bajado durante los años recientes, hasta el punto en que ya es factible tratar aguas que contengan de 200 a 1000 mg/L de sólidos totales disueltos y obtener un agua producto de 3 a 5 mg/L. Estos bajos niveles sólidos totales disueltos son alcanzados gracias a la instalación de módulos de electrodialisis de etapas múltiples.

En algunos casos, las aguas residuales de industrias químicas (procedentes de operaciones como lavado y regeneración, aguas procedentes de torres de enfriamiento o disposición de los efluentes químicos diluidos) son un problema significativo en las industrias cuando se requieren descargas nulas de efluentes. Algunas veces, ocurre que las aguas dirigidas hacia los efluentes contienen poco contenido de sales pero su contenido en sólidos totales disueltos es muy elevado. Muchas industrias presentan problemas de este tipo y han considerado la aplicación de la electrodialisis para solventar estos problemas.

La aplicación principal de la electrodialisis en los sistemas de tratamientos de aguas es en el procesado de aguas de lavado de la industria de la electrodeposición, en donde el agua y los iones metálicos pueden recircularse por completo.



Comparada con la Ósmosis Inversa, la electrodiálisis tiene la ventaja de utilizar membranas más estables térmica y químicamente, de forma que en el proceso puede trabajarse a temperaturas elevadas y con valores de pH elevados o bajos, además de que las concentraciones que pueden alcanzarse en la salmuera son significativamente mayores. La desventaja de la electrodiálisis es que solamente pueden eliminarse los componentes iónicos pero los aditivos que se encuentran normalmente en un baño de galvanizado no pueden recuperarse. ^[16]

II.4.) Aguas de Producción

Se denominan aguas de producción las aguas que son extraídas de los yacimientos de petróleo debido a que se encuentran en el yacimiento como aguas asociadas al mismo. La composición química de estas aguas (al igual que la composición de los crudos), varía de un lugar a otro.

El agua es uno de los mejores solventes que el hombre haya conocido, por esta razón, y debido a la baja velocidad de filtración del agua subterránea a través del medio poroso (percolación lenta) se proporcionó tiempo suficiente para que muchos de los minerales que la rodean se incorporaran a la solución ^[17]. Es por ello que estas aguas tienen características salinas, alcalinas, presencia de sólidos totales disueltos y gases disueltos. Por su alto contenido de minerales, estas aguas deben ser tratadas antes de ser reutilizadas en la inyección de agua al pozo o ser desechadas o vertidas a ríos, lagos o mares.

II.5.) Legislación Ambiental

En Venezuela existe un organismo encargado de verificar que se cumplan las normativas y leyes referentes al ambiente y es el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente.

Entre las normas que involucran el control de calidad de la contaminación del agua se encuentra el DECRETO 883, publicado en Gaceta Oficial de la República de Venezuela N°5.021 el 11 de octubre de 1995, el cual dicta las NORMAS PARA LA CLASIFICACIÓN Y EL CONTROL DE LA CALIDAD DE LOS CUERPOS DE AGUA Y VERTIDOS O EFLUENTES LÍQUIDOS. El objetivo principal de este



decreto es controlar la calidad de los cuerpos de agua teniendo en consideración sus usos actuales y potenciales.

En el Capítulo III (Del Control de los Vertidos Líquidos), Sección I (De las actividades sujetas a control), Artículo 7º, se enumeran las actividades que están sometidas a la aplicación del decreto, de acuerdo con la Clasificación Industrial Internacional Uniforme de las Naciones Unidas. Entre dichas actividades se encuentra la Producción de Petróleo Crudo y Gas Natural formando parte de la División 22, Agrupación 220 y Grupo 2200.

En la Sección II (De la clasificación de los constituyentes en los vertidos líquidos), del mismo Capítulo, Artículo 9º, se encuentra una clasificación de los constituyentes de los vertidos líquidos, los cuales se agrupan en dos categorías. Formando parte del Grupo II, es decir, de las sustancias o parámetros que aún cuando no se conozca de su efecto tóxico, agudo o crónico, generan condiciones en el cuerpo receptor que afectan la biota o que perjudican cualquier uso potencial de sus aguas, se encuentran los cloruros.

En la Sección III (De las descargas a cuerpos de agua), del mismo Capítulo, Artículo 10º, se encuentra los rangos y límites máximos de calidad de vertidos líquidos que sean o vayan a ser descargados, en forma directa o indirecta a ríos, estuarios, lagos y embalses; se encuentra que el límite máximo de vertido de cloruros a cuerpos de agua es de 1000 mg/L (1000ppm).

Como se puede observar, se hizo mención, brevemente, al contenido del Decreto 883 donde se resaltan los artículos que involucran las producciones petroleras y el vertido de cloruros a cuerpos de agua, debido a que son estos parámetros los que son objeto de estudio en esta investigación. En resumen, según este decreto, no pueden desecharse aguas provenientes de la producción petrolera a ríos, lagos o mares, con un contenido de cloruros mayor a los 1000 mg/L.



CAPÍTULO III. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Un trabajo de investigación surge de la motivación del investigador en la búsqueda de la resolución de un problema que se ha planteado. Por esta razón deben consultarse trabajos similares que se hayan realizado con anterioridad.

A continuación se presentan los antecedentes del presente proyecto, en los mismos se ha empleado la técnica de electrodiálisis en la desalación de aguas de producción. Es importante resaltar que no es mucho lo que se ha escrito sobre este tema en particular.

Reclaiming produced water for beneficial use: salt removal by electrodiagnosis.

T. SIRIVEDHIN, J. MCCUE Y L. DALLBAUMAN.

En este trabajo se empleó la técnica de electrodiálisis para remover las sales de cinco tipos de aguas sintéticas que simulaban diferentes pozos productores en Estados Unidos, tres de las cuales poseían alto contenido de sólidos disueltos y las dos restantes poseían bajo contenido de sólidos disueltos. El estudio se basó en la aplicación de tres distintos voltajes (3V, 6,5V y 9,8V) y la variación de la concentración de cationes y aniones. Se encontró que la tasa de transferencia de los iones (del más rápido al más lento) es $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ y $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$ y también que la concentración inicial de los aniones parece afectar su tasa de remoción cuando se aplican voltajes bajos. Finalmente, se observó que el porcentaje de remoción de los iones aumenta linealmente con el aumento del voltaje. ^[18]



Tratamiento de Aguas de Producción con Electrodiálisis

ISRRAEL MEDINA

En este trabajo se estudió la desalinización de soluciones preparadas llamadas Agua Sintética y Agua Sintética 2, una con baja y la otra con alta concentración de sales, similares a las aguas de producción del Campo Petrolero La Victoria, ubicado en el Estado Apure; con un equipo piloto de electrodiálisis modelo CH-O fabricado por la compañía Asahi Glass Co. aplicando gradientes de potencial de 30V. También se realizaron pruebas con una muestra de agua de producción del Campo La Victoria. Se constató la disminución de la salinidad de las soluciones logrando concentraciones de hasta 14 ppm de Cl. También se estudió el efecto de la velocidad del flujo en las aguas tratadas y el efecto de la concentración inicial en esta agua, encontrándose que favorece el aumento de la velocidad en la reducción de las concentraciones de cloruros, de igual manera se evaluó el traspaso de los cationes presentes en solución, observándose que siguen un orden de transferencia (desde el más rápido al más lento) $K^+ > Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$ en todos los casos inclusive en las aguas de producción. Se calculó también el consumo de energía para la electrodiálisis de la solución sintética, encontrándose que fue de 36 W·h/l aproximadamente para las aguas sintéticas y de 34 W·h/l para el agua de producción. Los porcentajes de reducción de iones logrados fueron en la mayoría de los casos del 99 %. [19]



CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

IV.1) Materiales de Laboratorio

Para la elaboración de este proyecto fueron requeridos materiales de distinta naturaleza:

- Vasos de precipitado de 250ml y 2000ml.
- Agitador.
- Espátula.
- Piseta.
- Frascos contenedores de muestras.
- Cronómetro.
- Matraces aforados de 100ml, 250ml, 1000 ml y 2000ml.
- Buretas de 10ml y 50ml.
- Sujetador de Buretas.
- Soporte Universal.
- Pipetas Volumétricas de 1ml, 5ml y 50ml.
- Propipeta.
- Matraces Erlenmeyer de 125ml y 250ml.

IV.2) Equipos Utilizados

Entre los equipos empleados en el tratamiento de las soluciones figuran:

- ♦ *Balanza Analítica Digital Denver Instruments.*



Figura IV.1. Balanza Analítica Digital.



♦ *Electrodializador*: Es el equipo utilizado para el tratamiento de desalación del Agua de Producción. En el laboratorio se emplea un Electrodializador modelo CH-O, fabricado por la compañía japonesa *ASAHI GLASS CO., LTD.* Este equipo, es un modelo hecho a escala piloto para usos experimentales, el cual suministra los mismos datos que un equipo industrial. Las especificaciones del equipo son las siguientes:

- Modelo: CH-O
- Número de Membranas: 10pares
- Membranas de Intercambio Aniónico: AMV (Estándar)
- Membranas de Intercambio Catiónico: CMV (Estándar)
- Membrana del Ánodo: CMV (Estándar)
- Membrana del Cátodo: CMV (Estándar)
- Dimensión de las Membranas: 160mm (ancho) * 280mm (largo)
- Dimensión Efectiva de las Membranas: 120mm (ancho) * 175mm (largo)
- Área Efectiva de las Membranas: 0,021 m²
- Espesor del Espaciador: 0,75mm
- Material del Ánodo: Pt/Ti
- Material del Cátodo: SUS316
- Material del sistema de tuberías: U-PVC
- Tanques de Almacenamiento: el Electrodializador cuenta con tres tanques de almacenamiento rectangulares de PVC de 3,5 litros de capacidad, cada uno para almacenar las soluciones de lavado de los electrodos, diluido y concentrado alimentadas al equipo.
- Medidores de Flujo (Rotámetros): cada circuito de flujo dispone de un rotámetro de área, hechos de PVC y acrílico, con un rango de medición de 30 a 300 L/h.
- Bombas: el equipo está provisto de tres bombas centrífugas fabricadas por *IWAKI PUMPS*, con una descarga máxima de 32 L/min a 38 L/min y, con un cabezal máximo de bombeo de 3,8m a 5,4m de agua (50-60 Hz).



Figura IV.2. Partes de un Electrodializador. (a) Equipo Electrodializador. (b) Módulo de Membranas en conjunto con electrodos. (c) Tanques. (d) Bombas. (e) Rotámetros.

En la Figura IV.3 se muestra un esquema de los circuitos hidráulicos del Electrodializador.

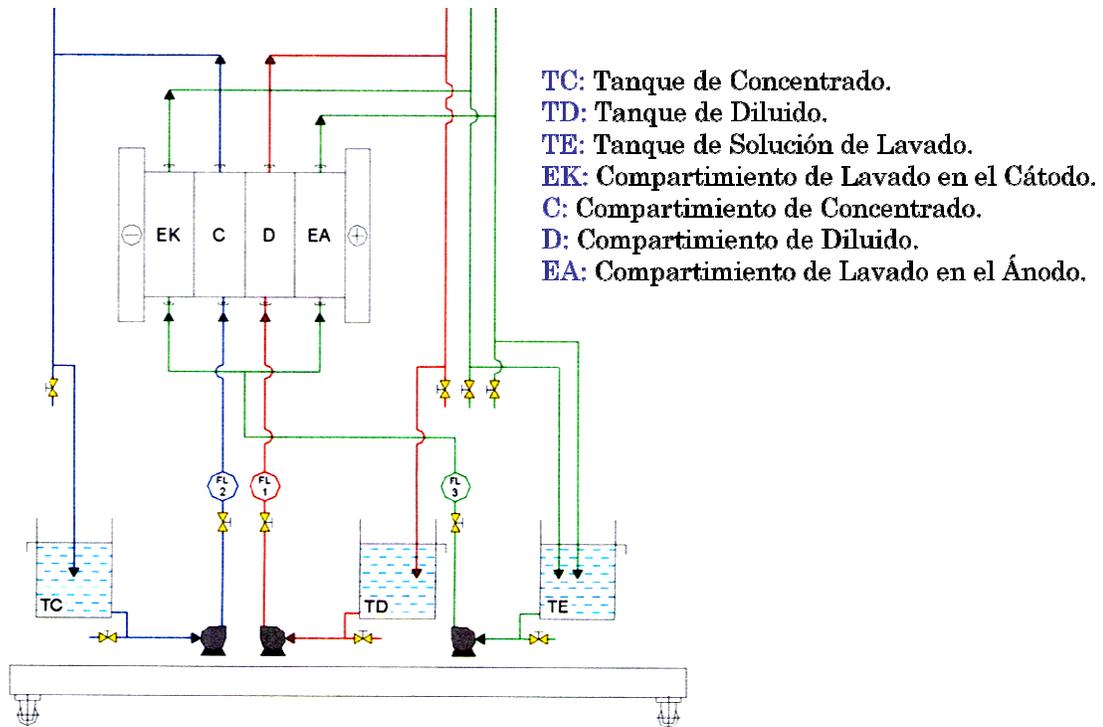


Figura IV.3. Circuitos Hidráulicos del Electrodiálizador.

www.bdigital.ula.ve

♦ *Fuente de Poder:* Se empleó para el suministro de energía. La fuente de poder es la modelo 350W – PAN35 – 10A, fabricada por *KIKUSUI*, la misma posee un voltaje y frecuencia de entrada de 120V, CA monofásica, 50/60Hz y un voltaje y corriente máximos de salida de 35V y 10A respectivamente.



Figura IV.4. Fuente de Poder Kikusui.



♦ *Conductímetro*: Se utilizó para medir las conductividades de las soluciones de diluido y concentrado durante cada una de las corridas. El conductímetro es modelo CON510 fabricado por *OATKON*, provisto de una celda de conductividad modelo WD-35608-50 con sensor de temperatura, que posee las siguientes características:

- Intervalo para la constante de celda: $0,75\text{cm}^{-1} - 0,95\text{cm}^{-1}$
- Rango de conductividad: $<100\text{mS/cm}$
- Rango de temperatura: $0^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$
- Cuerpo Epoxi
- Electrodo de Acero Inoxidable de Constante $K=1,0$



Figura IV.5. Conductímetro.

♦ *Equipo de Filtración con Papel Filtro*: Para el pre-tratamiento del agua de producción tratada. El equipo de filtración consta de los siguientes materiales:

- Matraz Kitasato
- Embudo tipo Buncher
- Papel filtro *WHATMAN®* de N#2, Cat N°1002150, 15cm de diámetro, 40 ashless y hecho de celulosa.
- Bomba de Vacío General Electric de 0,25hp.



Figura IV.6. Equipo de Filtración con Papel Filtro.



♦ *Filtro de Arena*: Para el pre-tratamiento de las aguas de producción tratadas se utilizó un filtro de arena. Este filtro se utilizó para disminuir la carga de sólidos al electrodiализador.



Figura IV.7. Filtro de Arena.

♦ *pH – metro*: Se utilizó para la medición del pH de varias soluciones. El utilizado es el modelo PHM210 fabricado por *METERLAB*. El mostrado en la foto es un modelo de radioanalytical.



Figura IV.8. Equipo de Medición de pH.

♦ *Tester (Digital Clamp Meter)*: Se empleó para la medición tanto del voltaje como el amperaje consumido por las bombas del Electrodiализador. El utilizado es el modelo YF-8010 fabricado por YFE.



Figura IV.9. Tester.



- ♦ *Colorímetro:* Se empleó para la determinación de la turbidez del agua. Se utilizó un colorímetro marca HACH modelo DR/890.

IV.3) Reactivos

Los reactivos utilizados durante la elaboración de este proyecto de investigación son los que se muestran en la Tabla IV.1.

Tabla IV.1. Reactivos empleados.

Compuesto	Fórmula	Marca	Pureza
Agua Destilada	H ₂ O	Destilador del Laboratorio	
Cloruro de Sodio	NaCl	Riedel de Haën	Ultrapuro
Sulfato de Sodio	Na ₂ SO ₄	Riedel de Haën	Grado Analítico
Ácido Sulfúrico	H ₂ SO ₄	Fluka	95% - 97%
Bicarbonato de Sodio	NaHCO ₃	Reactivos SA	
Cloruro de Potasio	KCl	Riedel de Haën	Grado Analítico
Cloruro de Calcio	CaCl ₂	Merck	Grado Analítico
Sulfato de Magnesio Hexahidratado	MgSO ₄ .6H ₂ O	Riedel de Haën	Grado Analítico
Nitrato de Plata	AgNO ₃	Reagents Chemicals	Grado Técnico
Cromato de Potasio	K ₂ CrO ₄	Merck	Grado Analítico
Negro de Erio Cromo T.	C ₂₀ H ₁₂ N ₃ NaO ₇ S	Merck	Grado Analítico
Cloruro de Amonio	NH ₄ Cl	J.T. Baker	99,8 %
Amoníaco	NH ₃	Riedel de Haën	25 %
Ácido Etilendiaminotetraacético (EDTA)	C ₁₀ H ₁₄ N ₂ Na ₂ O ₈ .2H ₂ O	J.T. Baker	Grado Analítico
Carbonato de Calcio	CaCO ₃	Merck	Grado Analítico
Murexida	C ₈ H ₈ N ₆ O ₆	Merck	Grado Analítico
Hidróxido de Sodio	NaOH	Industrias Químicas ERBA, C.A.	Grado Laboratorio
Cianuro de Sodio	NaCN	Merck	Grado Analítico



IV.4) Metodología Experimental

Para cumplir con los objetivos que se plantean en el presente proyecto se realizaron varios ensayos, que se describen a continuación.

IV.4.1.) Preparación de las Soluciones Empleadas

♦ *Solución de Cloruro de Sodio de 500ppm*

La solución de cloruro de sodio se emplea como la solución receptora de iones en el compartimiento de concentrado. Para todas las pruebas realizadas en el electrodiálizador se emplearon 2L de solución de cloruro de sodio de 500ppm de concentración, para lo cual se requiere diluir 1g de NaCl en 2L de agua destilada.

♦ *Solución de Sulfato de Sodio*

El sulfato de sodio es empleado como solución de lavado de los electrodos, debe prepararse con una concentración del 3% en peso (para la cual se requiere diluir 60g de NaSO₄ en 2L de agua destilada) y debe acidificarse con ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado hasta obtener un pH=2. Esta solución es colocada en el tanque de solución estabilizadora en el electrodiálizador.

IV.4.2.) Filtración del Agua de Producción del Campo La Victoria, ubicado en el Estado Apure.

El agua de producción puede contener partículas sólidas suspendidas que podrían traer problemas operacionales en las corridas de electrodiálisis al poder ocurrir el taponamiento de las membranas, por esta razón, es necesario filtrar dicha agua antes de ser sometida al proceso de electrodiálisis para su desalinización. Se realizaron dos tipos de procedimiento, uno con papel de filtro y otro con filtro de arena. Para el caso en el cual se usó *papel de filtro* el procedimiento fue:

1. Se humedece el papel filtro.
2. Se coloca el papel filtro sobre la superficie del embudo de manera que quede cubierta toda el área por donde pasa la solución filtrada.



3. Se coloca el embudo en el matraz kitasato con su respectiva goma para evitar que el aire entre al mismo. Se debe tener cuidado de que la parte inferior del embudo no coincida con la salida del aire.
4. Se conecta el matraz kitasato a la tubería que conecta con la bomba de vacío que hace la succión del aire dentro del kitasato mediante el uso de una manguera de conexión.
5. Se agrega la solución a filtrar en el embudo e inmediatamente se prende la bomba de vacío.
6. Cuando el nivel de líquido en el matraz kitasato ascienda considerablemente debe apagarse la bomba de vacío y trasvasar la solución a otro recipiente contenedor debidamente lavado, para luego seguir con la filtración.
7. Eventualmente, el sólido suspendido atrapado en el papel filtro ofrecerá una gran resistencia al paso del líquido, llegado este momento debe apagarse la bomba de vacío para colocar un nuevo papel filtro para continuar el proceso de filtración.
8. Si al término de la filtración de la solución se observa que todavía hay sólidos suspendidos, deberá repetirse el proceso de filtración.

Para el caso en el cual se usó el *filtro de arena* se introdujo en el mismo una cantidad de agua de producción de La Victoria (campo en el Estado Apure). Para ello se tomó el agua de producción de un tanque de almacenamiento de 12.000 L y, por medio de una bomba (Marca USA Hardware de 1hp), se hizo pasar a través del filtro de arena, con un flujo de unos 91 L/h (lo que produce un flujo por unidad de área de 31 m³/m².día). A la salida del filtro, el agua se recolectó en un bidón de 55 L y se trató luego en el electrodiálizador.

IV.4.3.) Desalación de las Aguas de Producción del Campo La Victoria

Para realizar las corridas de desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria en el electrodiálizador se siguió el procedimiento siguiente:

1. Se filtran 2L del Agua de Producción del Campo La Victoria. Se mide la conductividad de la solución filtrada y se introduce esta solución en el tanque de la solución de diluido. La filtración puede ser con papel filtro o con un filtro de arena.



2. Se preparan 2L de solución de NaCl de 500ppm. Se mide la conductividad de la solución preparada y se introduce esta solución en el tanque de la solución de concentrado.
3. Se preparan 2L de solución de sulfato de sodio al 3% y se ajusta el pH a 2 con ácido sulfúrico concentrado. Se introduce esta solución en el tanque de la solución de lavado. Se revisa continuamente que el pH este alrededor de 2, si no es el caso se ajusta el pH.
4. Se encienden las bombas, verificando previamente que las válvulas de salida de las bombas estén cerradas.
5. Por medio de los rotámetros, se fija la velocidad tangencial de flujo requerida (100L/h, 200L/h o 300L/h) para cada circuito. Se utiliza el mismo flujo en el circuito concentrado, diluido y lavado.
6. Se deja que los flujos circulen alrededor de 15 minutos a través del electrodiálizador con el objetivo de que las membranas de intercambio iónico se impregnen de las soluciones a tratar.
7. Una vez estabilizados los flujos, se enciende la fuente de poder y se fija la diferencia de potencial requerida (30V, 15V o 10V). Se oprime el botón de salida de la fuente. Simultáneamente se enciende el cronómetro.
8. A lo largo del proceso, se toman muestras de solución del tanque de diluido y de concentrado, las cuales deben ser identificadas para su uso posterior. Al momento de la toma de muestras deben anotarse tanto el tiempo como el amperaje (que va variando en el tiempo), el cual puede leerse en la fuente de poder. Posteriormente se mide la conductividad de cada una de las muestras y se anota su temperatura.
9. Una vez finalizada la toma de datos, se apaga la fuente de poder, el electrodiálizador y luego se cierran las válvulas de salida de las bombas.
10. Se vacían los tanques de almacenamiento.
11. Para lavar el sistema se introduce agua destilada en los tanques, se encienden las bombas y se deja circular alrededor de 30 minutos.
12. Para verificar la limpieza del equipo, se mide la conductividad del agua circulante, si es muy superior al valor de conductividad del agua pura, se repite el proceso de lavado.

IV.4.4.) Determinación de Cloruros empleando el Método de MOHR

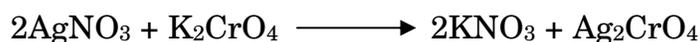
La determinación de cloruros puede hacerse mediante el método de *Mohr*, el cual es un método argentométrico. Este método es aplicable para la determinación de cloruros en aguas potables o superficiales siempre que no tengan excesivo color o turbidez. El mismo debe emplearse en soluciones ligeramente



alcalinas (cuyos pH oscilen entre 7 y 10). El método consiste en la adición de Nitrato de Plata como solución valorante y Cromato de Potasio como solución indicadora a la solución que contiene cloruros a valorar. Los cloruros (Cl^-) precipitan con el ión Ag^+ formando un compuesto muy insoluble de color blanco, cuando todo el producto (AgCl) ha precipitado se forma el cromato de plata, de color rojo ladrillo, que es menos insoluble que el nitrato de plata y nos señala el punto final de la valoración ^[19]. Las reacciones que ocurren se muestran a continuación:



Color Blanco



Color Rojo Ladrillo

A continuación se indican algunas observaciones sobre el método de *Mohr*:

- No debe utilizarse este método en el caso de aguas con contenido de cloruros menor a 30ppm.
- El pH de la muestra debe estar entre 7 y 10 debido a que, si el pH es menor a 7, se disolverá el Ag_2CrO_4 y se dificultará la detección del punto final, mientras que si el pH es mayor a 10, precipitaría el AgOH que es de color pardo y se cometerá un error ^[20].

El procedimiento que debe seguirse para la determinación de cloruros según el método de *Mohr* es el siguiente:

1. Preparación de Solución Patrón de Cloruro de Sodio

Para la determinación de cloruros por el método de *Mohr* deben prepararse 100ml de una solución patrón de cloruro de sodio aproximadamente de concentración 0,02N, para lo cual deben diluirse 0,117g de NaCl en 100ml de agua destilada, se debe homogeneizar muy bien la solución.



2. Estandarización de la Solución de Nitrato de Plata

Con una pipeta volumétrica, previamente lavada y curada, se miden 5ml de solución patrón de NaCl y se transfieren a un matraz Erlenmeyer de 250ml. Adicionalmente deben agregarse al matraz 1ml de solución indicadora de K_2CrO_4 (0,01N). Luego se inicia la titulación con $AgNO_3$ hasta observar el viraje del indicador desde un color amarillento hasta rojo ladrillo. Se repite el procedimiento hasta que el volumen de titulante no difiera en más de 0,1ml. Como lo que se quiere determinar es la concentración exacta del $AgNO_3$ se hace el cálculo siguiente:

$$meq_{AgNO_3} = meq_{NaCl}$$

$$C_{AgNO_3} \times V_{AgNO_3} = C_{NaCl} \times V_{NaCl}$$

$$C_{AgNO_3} = \frac{C_{NaCl} \times V_{NaCl}}{V_{AgNO_3}}$$

3. Determinación de cloruros en la muestra problema

Con una pipeta volumétrica, previamente lavada y curada, se miden 5ml de la muestra problema y se transfieren a un matraz Erlenmeyer de 250ml. Adicionalmente debe agregarse al matraz 1ml de solución indicadora de K_2CrO_4 (0,01N). Luego se inicia la titulación con $AgNO_3$ hasta observar el viraje del indicador desde un color amarillento hasta rojo ladrillo. Se repite el procedimiento hasta que el volumen de titulante no difiera en más de 0,1ml. Como lo que se quiere determinar es la cantidad de cloruros presentes en la muestra problema se hace el cálculo siguiente:

$$meq_{Cl^-} = meq_{AgNO_3}$$

$$mg_{Cl^-} = C_{AgNO_3} \times V_{AgNO_3} \times PE_{Cl^-}$$

Si lo que queremos es la concentración de los cloruros en partes por millón:



$$\text{ppm Cl}^- = \frac{C_{\text{AgNO}_3} \times V_{\text{AgNO}_3} \times PE_{\text{Cl}^-} \times 1000}{V_{\text{Muestra Problema}}} = \frac{C_{\text{AgNO}_3} \times V_{\text{AgNO}_3} \times 35,5 \times 1000}{V_{\text{Muestra Problema}}}$$

Donde ppm Cl⁻ se encuentra en miligramos de cloruros por litro de muestra problema.

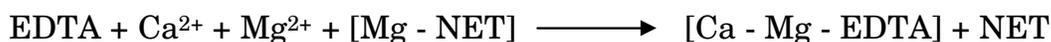
IV.4.5.) Determinación de la Dureza del Agua y de los iones Calcio y Magnesio empleando el Método de Volumetría de Formación de Complejos.

La determinación de los iones calcio y magnesio, así como también la suma de ambos (Dureza) puede hacerse mediante el método de *Volumetría de Formación de Complejos*. El método consiste en la determinación de los carbonatos de calcio y magnesio contenidos en una muestra mediante la adición de la sal disódica del ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) como solución acomplejante y un indicador metalocrómico para detectar el punto final; en el caso de la dureza se emplea el Negro de Eriocromo T (NET) y, en el caso del calcio la Murexida. En medio alcalino, el EDTA forma complejos estables tanto con el calcio como con el magnesio pero, la constante de formación del complejo del calcio es mayor que la del magnesio por lo que, si al agua se le añade EDTA se forma primero el complejo Ca-EDTA que el Mg-EDTA.

Si a una muestra de agua, alrededor de un pH de 10, se añade NET, aparece un color púrpura del complejo Mg-NET el cual es menos estable que el complejo Mg-EDTA por lo que al añadir el valorante, en primer lugar se acompleja el calcio libre, luego lo hace el magnesio libre y por último se produce el desplazamiento del magnesio acomplejado con el indicador y la disolución cambia a un color azul celeste, que es el color del indicador libre en medio alcalino, lo que indica el punto final de la titulación.



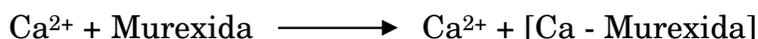
Color Púrpura



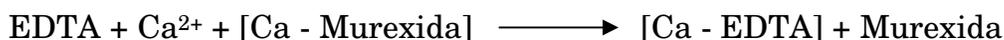
Color Azul



Ahora bien, a un pH entre 12 y 13, la murexida forma con el ión calcio un complejo de color rosado menos estable que el complejo Ca-EDTA por lo que, al añadir EDTA, en primer lugar se compleja el ión libre, después lo hace el calcio del complejo Ca-Murexida y, cuando todo el calcio ha reaccionado se produce el cambio de color de la disolución al color del indicador libre que es violeta en medio alcalino, lo que indica el final de la titulación [21]. Además, a este pH precipita todo el magnesio como hidróxido, por lo que se titula sólo el calcio. Las reacciones del método se indican a continuación:



Color Rosado



Color Violeta

La diferencia entre los volúmenes de valorante (EDTA) gastados en ambas volumetrías permite determinar la concentración de magnesio. El procedimiento que debe seguirse para la determinación de la dureza y de los iones calcio y magnesio según el método de *Volumetría de Formación de Complejos* es el siguiente:

1. Preparación de Solución Patrón de Carbonato de Calcio

La solución de carbonato de calcio se utiliza para estandarizar la solución de EDTA que se emplea para la determinación de la dureza del agua en varias muestras. Deben prepararse 500ml de solución patrón de carbonato de calcio con un título de 1 mg/ml, para lo cual se requiere diluir 0,5g de CaCO_3 en 500ml de agua destilada y agregar varias gotas de amoníaco para aclarar la solución.



2. Estandarización de la Solución de EDTA

La solución de EDTA se emplea para la determinación de la dureza del agua. Se debe preparar 1L de esta solución, para lo cual es necesario diluir 3,7224g de EDTA y 0,1g de cloruro de magnesio hexahidratado en 1L de agua destilada. Como lo que se quiere determinar es la concentración exacta del EDTA se hace el cálculo siguiente:

$$C_{\text{CaCO}_3} \times V_{\text{CaCO}_3} = C_{\text{EDTA}} \times V_{\text{EDTA}}$$
$$C_{\text{EDTA}} = \frac{C_{\text{CaCO}_3} \times V_{\text{CaCO}_3}}{V_{\text{EDTA}}} = \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{ml EDTA}}$$

3. Preparación de la Solución Amortiguadora (pH=10)

Es una solución amortiguadora de Amoníaco – Cloruro de Amonio, que se emplea para mantener un pH ligeramente por encima de 10 para la determinación de la dureza de varias muestras. Para preparar esta solución se deben diluir 6,5g de cloruro de amonio en 57ml de amoníaco concentrado en un matraz de 100ml y luego diluir con agua destilada hasta llegar al aforo.

4. Preparación del indicador NET (Negro de Eriocromo T)

El Negro de Eriocromo T se emplea como indicador en la determinación de la dureza del agua. Se prepara mezclando 0,5g de Negro de Eriocromo T con 100g de cloruro de sodio y triturando en un mortero hasta obtener un polvo homogéneo.

5. Preparación de Murexida.

La murexida se emplea como indicador en la determinación del contenido de iones calcio de varias muestras. Se prepara mezclando 0,5g de murexida con 100g de cloruro de sodio y triturando en un mortero hasta obtener un polvo homogéneo.



6. Solución de Hidróxido de Sodio (pH=12)

El hidróxido de sodio se emplea para mantener un pH ligeramente por encima de 12 para la determinación del contenido de iones calcio de varias muestras. Se prepararon 250ml de hidróxido de sodio 2M, para lo cual fue necesario diluir 20g de NaOH en 250ml de agua destilada.

7. Solución de Cianuro de Sodio

El cianuro de sodio se emplea como acomplejante de los metales pesados que puedan estar presentes en varias muestras, para la determinación del contenido de iones calcio en las mismas. Se prepararon 250ml de cianuro de sodio 0,41M; para lo cual fue necesario diluir 5g de NaCN en 250ml de agua destilada.

8. Determinación de la dureza de las muestras problema

Con una pipeta volumétrica, previamente lavada y curada, se miden 5ml de la muestra problema y se transfieren a un matraz Erlenmeyer de 125ml. Adicionalmente deben agregarse al matraz 1ml de solución amortiguadora y una pizca del indicador NET. Luego se inicia la titulación con EDTA hasta observar el viraje del indicador desde un color púrpura hasta azul celeste. Se repite el procedimiento hasta que el volumen de titulante no difiera en más de 0,1ml. Como lo que se quiere determinar es la cantidad iones carbonato de calcio y magnesio presentes en la muestra problema se hace el siguiente cálculo:

$$C_{\text{Muestra}} \times V_{\text{Muestra}} = C_{\text{EDTA}} \times V_{\text{EDTA}}$$
$$C_{\text{Muestra}} = \frac{C_{\text{EDTA}} \times V_{\text{EDTA}}}{V_{\text{Muestra}}} \times 1000 \frac{\text{ml}}{\text{L}} = \text{ppm CaCO}_3$$



9. Determinación del calcio de las muestras problema

Con una pipeta volumétrica, previamente lavada y curada, se miden 5ml de la muestra problema y se transfieren a un matraz Erlenmeyer de 125ml. Adicionalmente deben agregarse al matraz 1ml de solución de hidróxido de sodio, 1ml de solución de cianuro de sodio y una pizca del indicador murexida. Luego se inicia la titulación con EDTA hasta observar el viraje del indicador desde un color rosado hasta violeta. Se repite el procedimiento hasta que el volumen de titulante no difiera en más de 0,1ml. Como lo que se quiere determinar es la cantidad iones calcio presentes en la muestra problema se hace el siguiente cálculo:

$$C_{\text{Muestra}} \times V_{\text{Muestra}} = C_{\text{EDTA}} \times V_{\text{EDTA}}$$
$$C_{\text{Muestra}} = \frac{C_{\text{EDTA}} \times V_{\text{EDTA}}}{V_{\text{Muestra}}} \times 1000 \frac{\text{ml}}{\text{L}} = \text{ppmCaCO}_3$$

$$\text{ppmCa}^{2+} = \text{ppmCaCO}_3 \times \frac{\text{PM}_{\text{Ca}^{2+}}}{\text{PM}_{\text{CaCO}_3}}$$

www.bdigital.ula.ve

10. Determinación del magnesio de las muestras problema

Como se dijo anteriormente la diferencia entre la volumetría para determinar la dureza y la volumetría para determinar el calcio permite determinar el magnesio. El cálculo que debe hacerse es el siguiente:

$$C_{\text{MgCO}_3} = \text{Dureza} - C_{\text{CaCO}_3} = \text{ppmCaCO}_3$$

$$\text{ppmMg}^{2+} = \text{ppmCaCO}_3 \times \frac{\text{PM}_{\text{Mg}^{2+}}}{\text{PM}_{\text{CaCO}_3}}$$



IV.4.6.) Determinación del Consumo Energético

La energía total consumida tiene dos contribuciones, debido a que hay consumo de energía debido a la separación y consumo de energía debido a las bombas.

1. Energía Consumida por las Bombas

La energía consumida en el bombeo puede calcularse debido a que puede medirse tanto la diferencia de potencial (113,0V) como la intensidad de la corriente (0,3A) consumida por las bombas, con lo que puede calcularse finalmente la potencia consumida por las bombas, que corresponde con 33,8W. Además se debe tener en cuenta el tiempo total de bombeo, el cual es aproximadamente de unos 60 minutos por cada experiencia (15 minutos para que las membranas se impregnen de las soluciones, 15 minutos para que ocurra la separación y 30 minutos de lavado de las membranas) y que el caudal de flujo es de 2L (agua tratada). La energía consumida debido al bombeo puede calcularse según:

$$E_{\text{BOMBEO}} = \frac{P \text{ (W)} \times t_{\text{operación}} \text{ (min)}}{Q_{\text{Agua}} \text{ (L)}} \times \frac{1\text{h}}{60\text{min}} = \frac{33,8\text{W} \times 60\text{min}}{2\text{L}} \times \frac{1\text{h}}{60\text{min}} = 16,90 \frac{\text{W.h}}{\text{L}}$$

2. Energía Consumida debido a la separación

Para cada corrida de electrodiálisis se toma nota de la variación del amperaje en función del tiempo con el objetivo de hacer una gráfica de Intensidad de Corriente (Amperaje) en función del tiempo, en la cual puede hacerse un ajuste para obtener la ecuación de la curva. El área bajo esta curva (la cual se obtiene de la integración de la ecuación del ajuste) representa la intensidad total gastada en función del tiempo de operación, al multiplicar el valor del área bajo la curva por la diferencia de potencial aplicada puede obtenerse el consumo de energía. Debe recordarse que toda esa energía se gasta para tratar 2L de agua. La Energía consumida debido a la separación puede calcularse según las expresiones:



$$\text{Área bajo la curva (Amperio.min)} = \int_0^{t_{final}} I(t) dt$$

$$E_{SEPARACIÓN} = \frac{\text{Área bajo la curva (Amperio.min)} \times \text{Voltaje (V)}}{Q_{\text{Agua}} \text{ (L)}} \times \frac{1\text{h}}{60 \text{ min}}$$

www.bdigital.ula.ve



CAPÍTULO V. RESULTADOS

V.1.) Caracterización del Agua de Producción del Campo Petrolero La Victoria.

Es de vital importancia conocer las características iniciales del agua de producción en estudio para que, una vez sometida al proceso de electrodiálisis (a distintas condiciones de operación), se pueda establecer si ha habido un cambio significativo al final del mismo. Las características iniciales del agua de producción se pueden observar en la Tabla V.1.

Tabla V.1. Características iniciales del Agua de Producción del Campo La Victoria.

Característica		Valor
Conductividad		9,13 ± 0,08 mS/cm
pH		8,19 @ 21°C
Turbidez	Antes de filtrar	17 NTU
	Después de filtrar con filtro de arena	6 NTU
Sólidos Totales		0,599%
Cenizas		0,576%
Cloruros		3306,4 ppm Cl ⁻
Dureza		1076,2 ppm CaCO ₃
Calcio		320 ppm Ca ²⁺
Magnesio		66,3 ppm Mg ²⁺

V.2.) Resultados de las Corridas de Desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria.

Durante la realización de este proyecto de investigación el agua de producción del campo La Victoria fue sometida a un proceso de electrodiálisis a distintas condiciones de operación, en las cuales las variables del proceso fueron la diferencia de potencial aplicada y la velocidad tangencial del flujo, principalmente con el objetivo de disminuir sus iones en solución, especialmente los iones cloruros (Cl⁻), para cumplir la normativa legal vigente (Decreto 883). Las distintas condiciones de operación a las cuales se sometió el agua de producción en el electrodiálizador se muestran en la Tabla V.2.

**Tabla V.2.** Condiciones de operación del Agua de Producción del Campo La Victoria.

Corrida *	Diferencia de Potencial (V)	Velocidad Tangencial (L/h)
1	30	100
2	30	200
3	30	300
4	15	100
5	15	200
6	15	300
7	10	100
8	10	200
9	10	300

* Cada corrida se realizó por duplicado con el objetivo de obtener resultados más confiables. En adelante se mostrará como resultado el promedio obtenido de las corridas realizadas por duplicado; los datos completos pueden observarse en los Anexos.

En el proceso de electrodiálisis hay dos compartimientos: el Diluido (solución a la cual se desea retirar iones) y el Concentrado (solución receptora de iones). Para cada una de las corridas realizadas en el electrodiálizador se empleó una solución de NaCl de 500ppm de concentración en el compartimiento “Concentrado”, mientras que, en el compartimiento de “Diluido” se empleó el agua de producción del campo La Victoria, cuyas características iniciales fueron descritas con anterioridad. Las corridas se llevaron a cabo en un tiempo de 15 minutos. Los resultados se muestran en el Anexo I.

En la Figura V.1 se observa la variación de la conductividad de cada uno de los compartimientos del electrodiálizador para cada una de las corridas realizadas. En general, se observó que a medida que transcurre el tiempo la conductividad en el compartimiento Diluido va disminuyendo, en tanto que, la conductividad en el compartimiento Concentrado va aumentando. La disminución de la conductividad en el compartimiento Diluido indica que con el transcurrir del tiempo esta solución experimenta una disminución de sus iones en solución y, análogamente, la solución en el compartimiento Concentrado experimenta un aumento de sus iones en solución, por lo que se puede inferir que existe una migración de los iones contenidos en el agua de producción del campo La Victoria hacia la solución de NaCl de 500ppm de concentración, acorde con los resultados esperados.

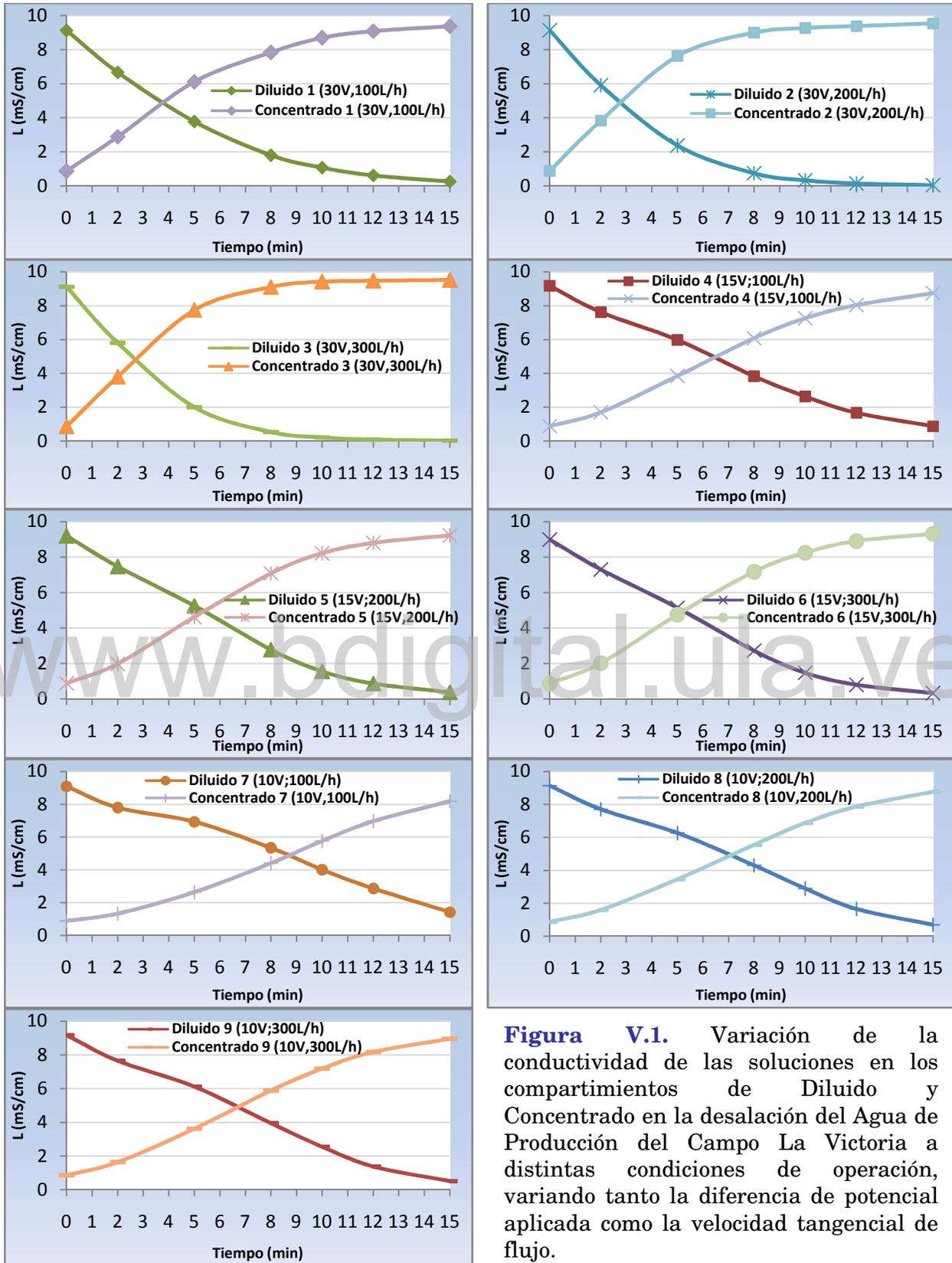
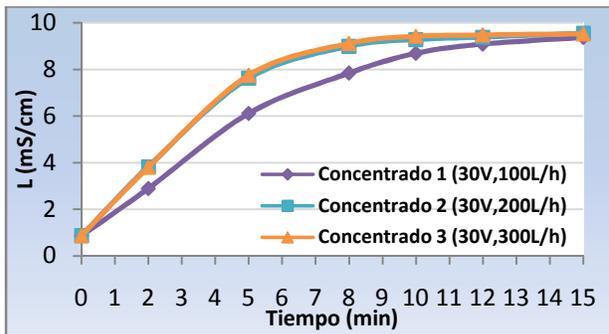
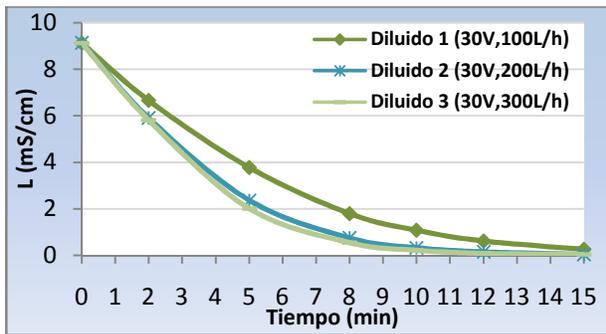


Figura V.1. Variación de la conductividad de las soluciones en los compartimientos de Diluido y Concentrado en la desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria a distintas condiciones de operación, variando tanto la diferencia de potencial aplicada como la velocidad tangencial de flujo.

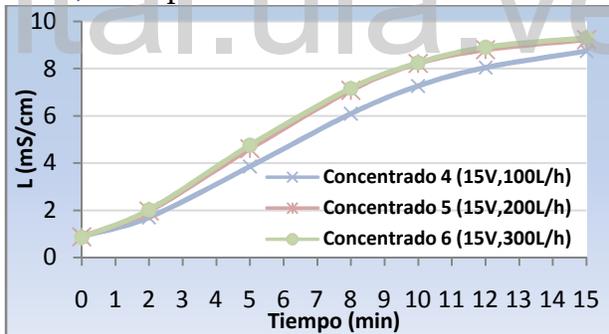
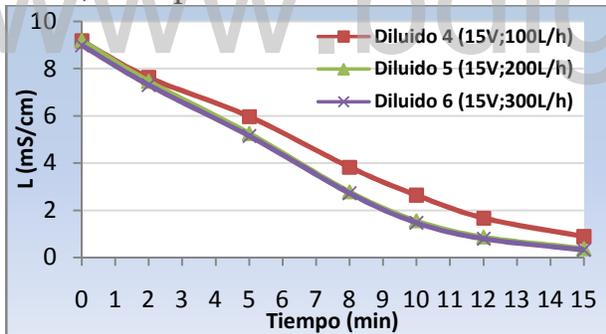


Ahora bien, en la Figura V.2 se puede observar que al comparar tanto las corrientes de diluido como las de concentrado realizadas a una misma diferencia de potencial, ocurre mayor transferencia de iones en las corridas realizadas a mayor velocidad tangencial, es decir, a voltaje constante la migración de iones de la corriente de diluido hacia la corriente de concentrado es mayor a medida que se aumenta la velocidad tangencial de flujo. También es importante hacer notar que la disminución de la conductividad ocurre de forma similar en las corridas realizadas a 200 L/h y a 300 L/h, este hecho indica que a éstas condiciones la transferencia de masa es similar y se puede inferir que la influencia de la capa límite no debe variar significativamente si se aumentase aún más la velocidad de flujo.



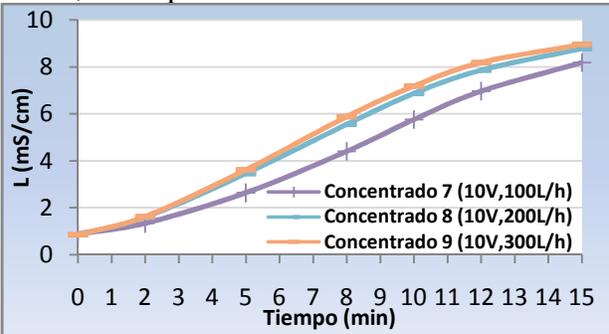
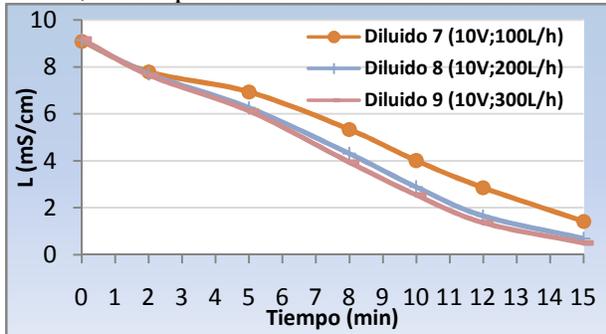
a) Compartimiento Diluido a 30V.

b) Compartimiento Concentrado a 30V.



c) Compartimiento Diluido a 15V.

d) Compartimiento Concentrado a 15V.



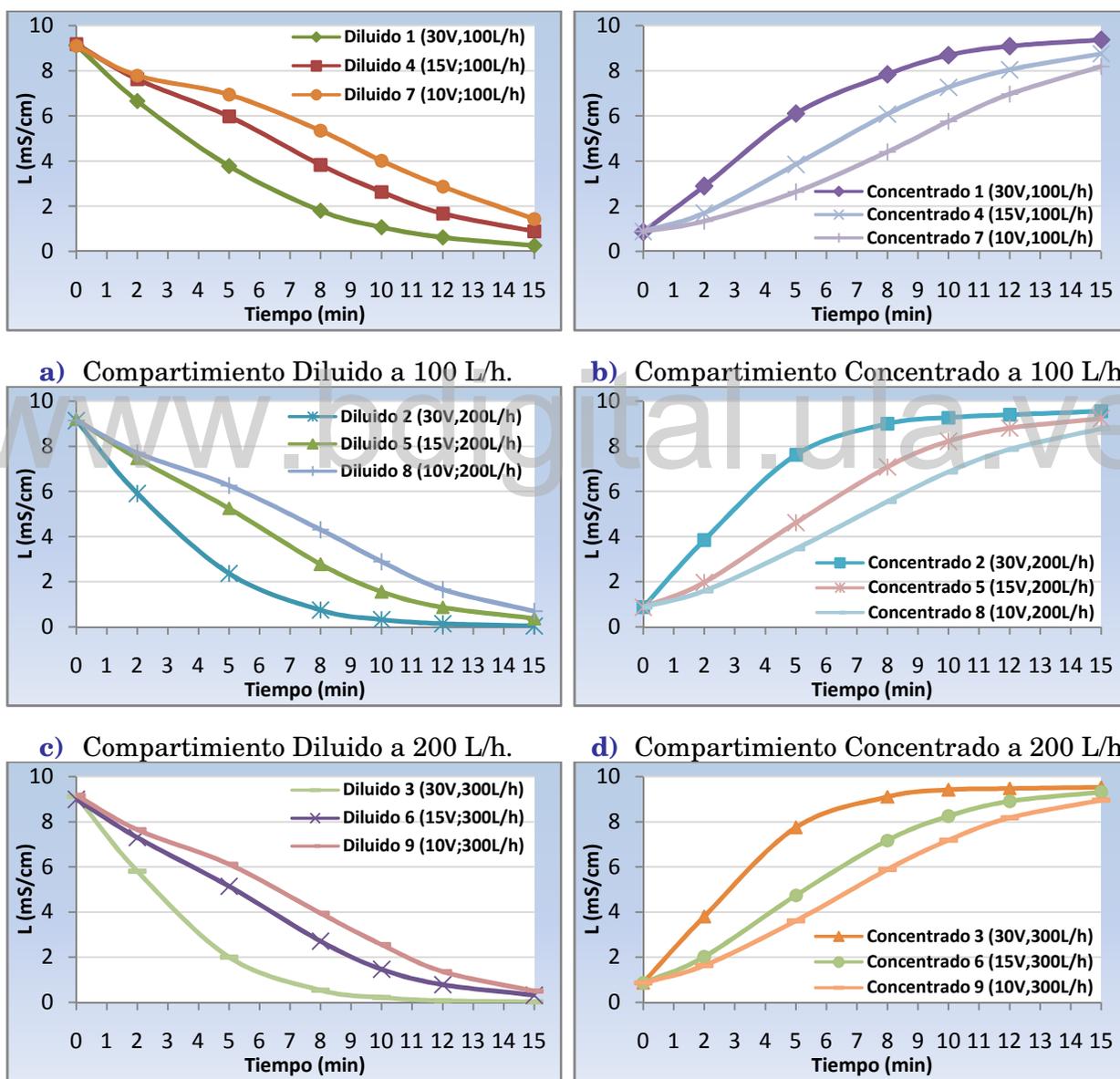
e) Compartimiento Diluido a 10V.

f) Compartimiento Concentrado a 10V.

Figura V.2. Corridas realizadas en el electrodiálizador aplicando una diferencia de potencial constante, variando la velocidad tangencial de flujo.



Un comportamiento similar ocurre al comparar tanto las corrientes de diluido como las de concentrado realizadas a una misma velocidad tangencial de flujo. En la Figura V.3 se observa que ocurre mayor transferencia de iones en las corridas realizadas a mayor diferencia de potencial, es decir, a un flujo constante la migración de iones de la corriente de diluido hacia la corriente de concentrado es sustancialmente mayor a medida que se aumenta la diferencia de potencial aplicada.



e) Compartimiento Diluido a 300 L/h. f) Compartimiento Concentrado a 300 L/h.
Figura V.3. Comparación de las corridas realizadas en el electrodiálizador a velocidad tangencial de flujo constante, variando la diferencia de potencial.



El comportamiento observado en la Figura V.3 es de esperarse ya que la transferencia de masa en la electrodiálisis es directamente proporcional al potencial aplicado, siempre y cuando se opere por debajo de la corriente límite, como es el caso presentado en la figura indicada.

Seguidamente, en la Figura V.4, se muestra el comportamiento de las soluciones en el compartimiento Diluido (donde se encuentra el agua de producción del Campo La Victoria) para cada una de las corridas realizadas; en la misma se puede observar que se tiene una mayor transferencia en la medida en que se aumenta tanto la diferencia de potencial aplicada como la velocidad tangencial de flujo, lo que corresponde con el siguiente orden:

Diluido 3 > Diluido 2 > Diluido 1 > Diluido 6 > Diluido 5 > Diluido 4 > Diluido 9 > Diluido 8 > Diluido 7

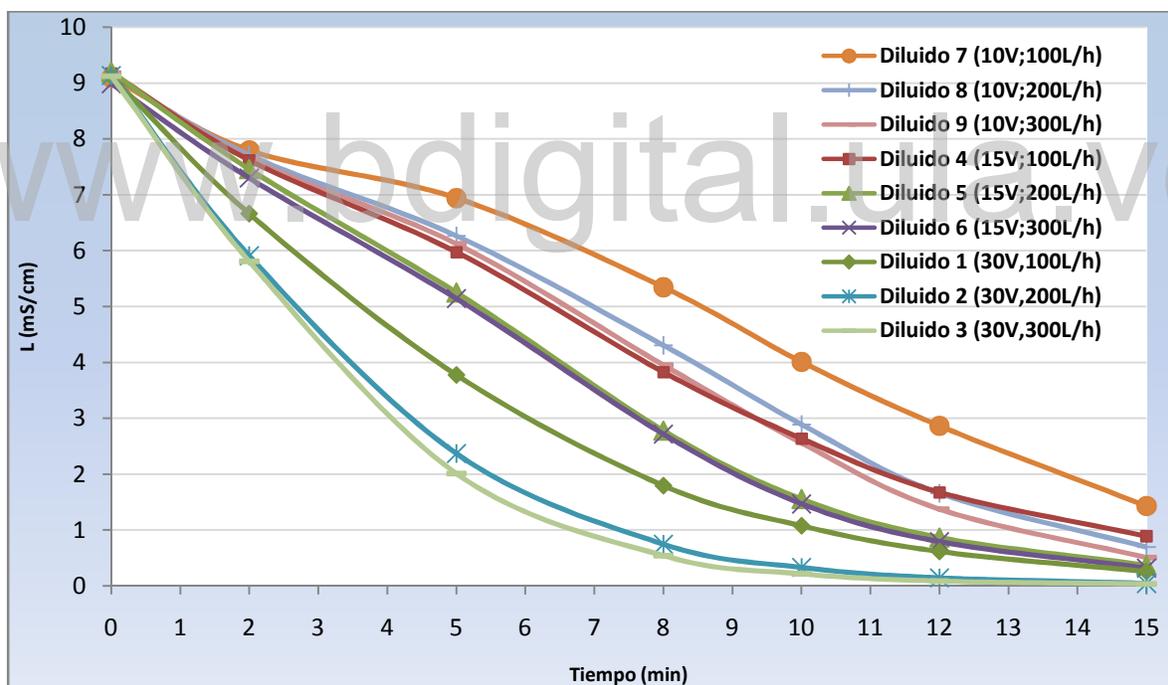


Figura V.4. Disminución de la conductividad del agua de producción del Campo La Victoria de cada una de las corridas realizadas en el electrodiálizador.

Sin embargo, este orden de transferencia de iones es alterado alrededor del décimo minuto donde la conductividad de la solución Diluido 9 ($2,55 \text{ mS/cm}$) comienza a ser menor que la conductividad de la solución de Diluido 4 ($2,64 \text{ mS/cm}$),



por lo que se puede inferir que a partir de este tiempo se logra una mayor transferencia de iones operando a 10V y 300 L/h que a 15V y 100L/h. Ahora, al seguir observando la figura se puede notar que alrededor del décimo segundo minuto la conductividad de la solución Diluido 8 (1,659 mS/cm) comienza a ser menor que la conductividad de la solución de Diluido 4 (1,675 mS/cm), por lo que se puede concluir que a partir de este tiempo se logra una mayor transferencia de iones operando a 10V y 200 L/h que a 15V y 100L/h. Finalmente, se observa que al final del proceso (15 minutos de operación) el orden de transferencia de iones es el que sigue:

Diluido 3 > Diluido 2 > Diluido 1 > Diluido 6 > Diluido 5 > Diluido 9 > Diluido 8 > Diluido 4 > Diluido 7

El comportamiento mostrado anteriormente es factible, ya que se toman en cuenta dos variables que influyen en la transferencia de los iones, el gradiente de potencial eléctrico y la velocidad de flujo. Al combinar ambas variables, puede que una influya más a ciertas condiciones que otra y se observan los cambios en la velocidad de transferencia mostrados en la figura V.4.

V.3.) Curvas de Cloruros obtenidas en la Desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria

Una vez realizadas todas las pruebas de desalación del agua de producción de Campo La Victoria en el equipo electrodiálizador a distintas condiciones de operación, se procedió a determinar la concentración de los iones cloruro (Cl^-) de cada una de las muestras tomadas en el compartimiento de Diluido en función del tiempo de operación y, para ello se empleó el Método de Mohr. Los resultados obtenidos se muestran en el Anexo II.

En la Figura V.5 se pueden observar las curvas de cloruro obtenidas para cada una de las corridas realizadas, sólo el compartimiento de Diluido que es el compartimiento de interés puesto que es allí donde se encuentra el agua de producción del campo La Victoria. En la figura mencionada se observa que en todas las corridas realizadas se encontró la misma tendencia, que no es más que a medida que transcurre el tiempo de operación la concentración de iones cloruro va disminuyendo, hasta que al final de la operación el porcentaje de reducción de estos iones supera el 90% en la mayoría de los casos.

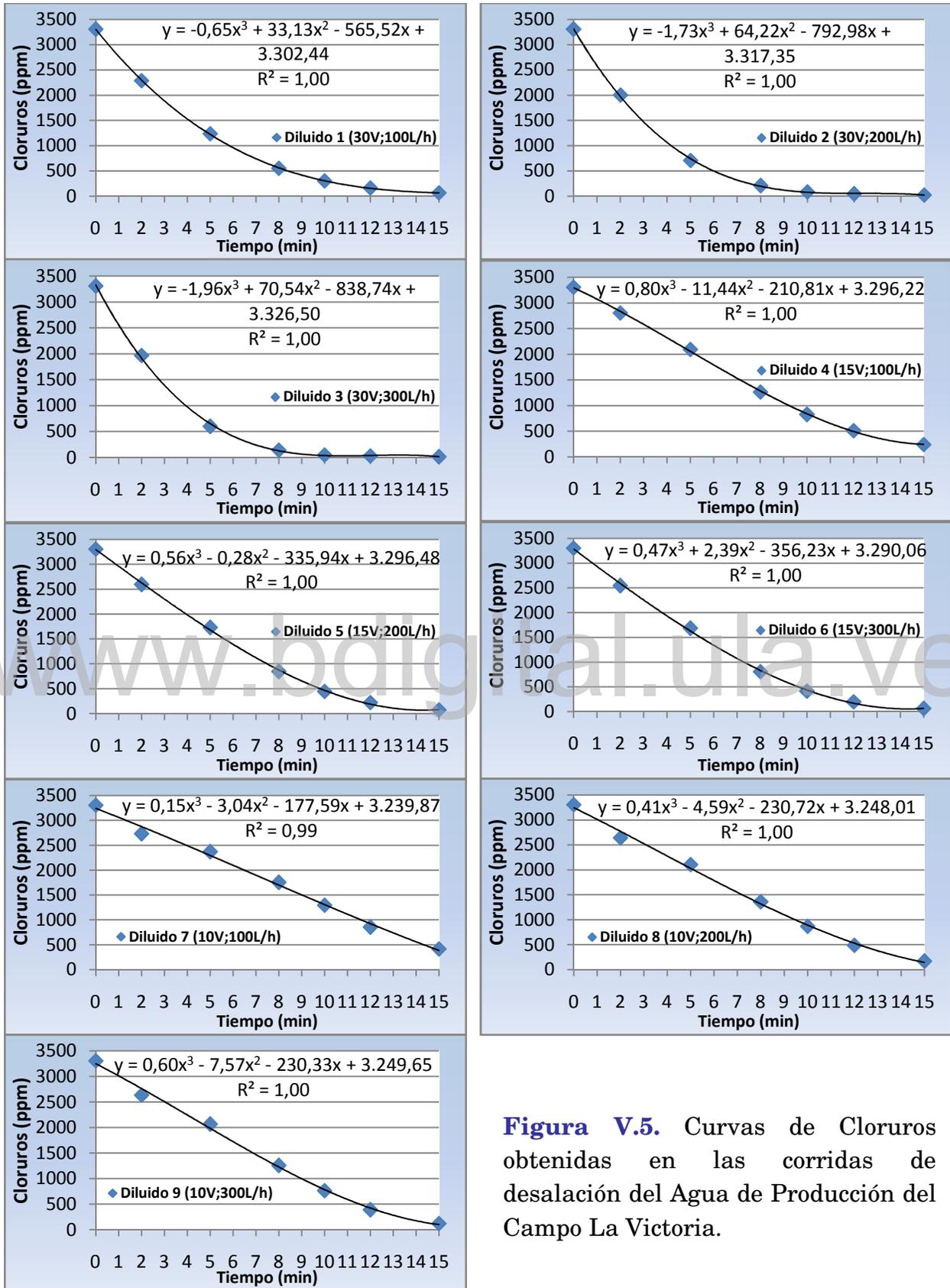
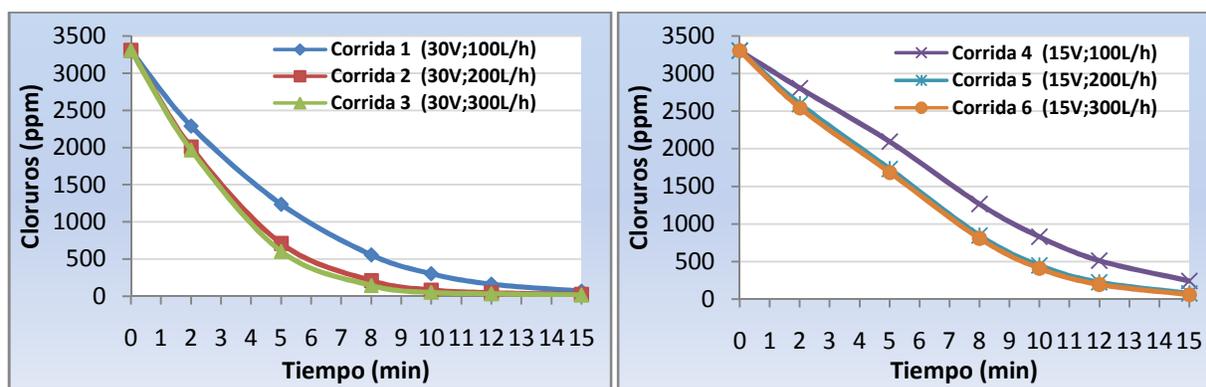


Figura V.5. Curvas de Cloruros obtenidas en las corridas de desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria.

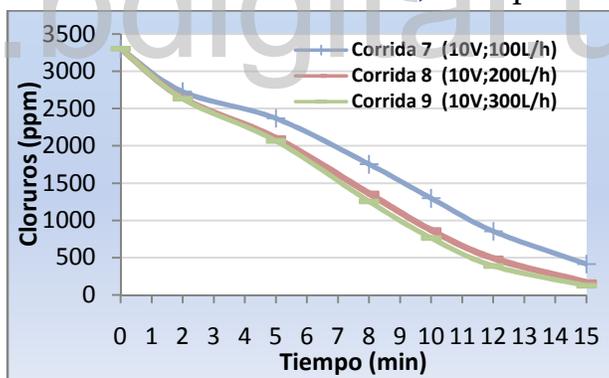


Si se comparan las curvas de cloruros de las corridas realizadas a una misma diferencia de potencial (Figura V.6) se observa que ocurre mayor transferencia de estos iones a medida que se incrementa la velocidad tangencial de flujo, comportamiento este que es consistente con el resultado obtenido anteriormente al medir las conductividades de estas soluciones, que están directamente relacionadas con la concentración de iones en general y por supuesto con la concentración de cloruros.



a) Compartimiento Diluido a 30V.

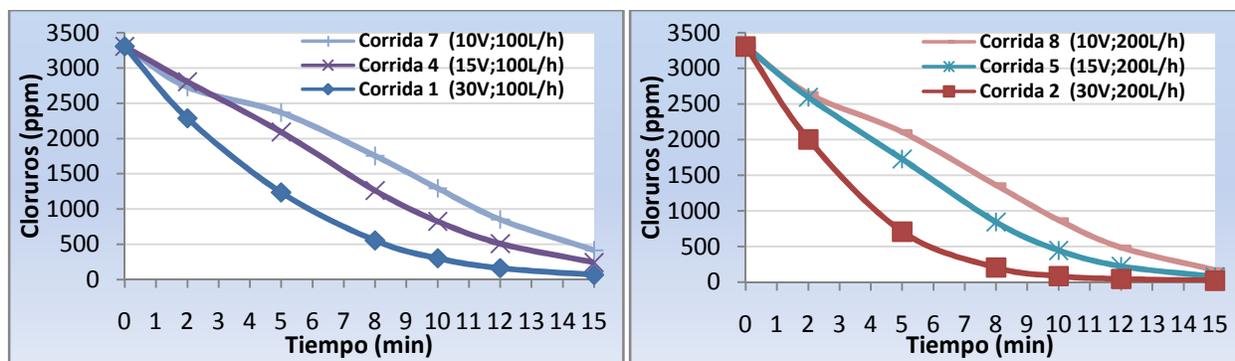
b) Compartimiento Diluido a 15V.



c) Compartimiento Diluido a 10V.

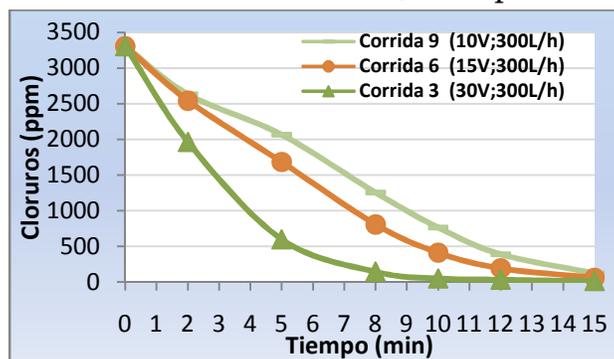
Figura V.6. Curvas de Cloruros (Cl⁻) de los compartimientos de Diluido aplicando una diferencia de potencial constante y variando la velocidad tangencial de flujo.

De igual manera, si se comparan las curvas de cloruros de las corridas realizadas a una misma velocidad tangencial de flujo (Figura V.7) se observa que ocurre mayor transferencia de estos iones a medida que se incrementa la diferencia de potencial aplicada, también acorde con los resultados obtenidos al medir las conductividades de estas soluciones.



a) Compartimiento Diluido a 100L/h.

b) Compartimiento Diluido a 200L/h.



c) Compartimiento Diluido a 300L/h.

Figura V.7. Curvas de Cloruros (Cl^-) de los compartimientos de Diluido operando a una velocidad tangencial de flujo constante y variando la diferencia de potencial aplicada.

La determinación de las curvas de cloruros también se hizo con el objetivo de poder calcular el tiempo a partir del cual estos iones alcanzan los 1000ppm de concentración, que es la máxima que permite la normativa legal vigente, acorde con lo descrito en el Decreto 883. Por otra parte, con las curvas de cloruros también se puede determinar el porcentaje de reducción de estos iones al final del proceso. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla V.3.



Tabla V.3. Resultados obtenidos en la determinación de iones cloruro realizada al Agua de Producción del Campo La Victoria a distintas condiciones de operación.

Muestra	Tiempo para alcanzar 1000ppmCl ⁻	Tiempo para alcanzar 500ppmCl ⁻	Estado	ppm Cl ⁻ (15min)	Reducción
Agua de Producción	-----	-----	Inicial	3306,4	-----
Diluido 1 (30V; 100L/h)	5,839 min	8,425 min	Final	66,5	98,0 %
Diluido 2 (30V; 200L/h)	4,175 min	5,989 min	Final	22,8	99,3 %
Diluido 3 (30V; 300L/h)	3,932 min	5,589 min	Final	14,0	99,6 %
Diluido 4 (15V; 100L/h)	9,253 min	12,011 min	Final	241,7	92,7 %
Diluido 5 (15V; 200L/h)	7,490 min	9,825 min	Final	75,3	97,7 %
Diluido 6 (15V; 300L/h)	7,299 min	9,635 min	Final	59,5	98,2 %
Diluido 7 (10V; 100L/h)	11,626 min	14,401 min	Final	415,1	87,4 %
Diluido 8 (10V; 200L/h)	9,468 min	12,166 min	Final	169,9	94,9 %
Diluido 9 (10V; 300L/h)	9,004 min	11,574 min	Final	120,8	96,3 %

En la Tabla V.3 se observa claramente que la concentración de iones cloruro en las distintas soluciones disminuye a niveles inferiores de los exigidos por la ley, es decir, las soluciones que inicialmente tenían una concentración mayor a los 1000ppm reglamentarios, luego de ser tratadas empleando la técnica de electrodiálisis disminuyeron dicha concentración significativamente en un tiempo relativamente muy corto. Es importante destacar que el tiempo transcurrido para alcanzar los 1000ppm Cl⁻ disminuye a medida que se aumenta tanto la diferencia de potencial aplicada como la velocidad tangencial de flujo, esto se evidencia puesto que la solución que tardó menos tiempo en llegar a esta concentración fue la de Diluido 3 (3,932 min) cuyas condiciones de operación son óptimas (30V y 300L/h), mientras que la solución que tardó más tiempo fue la de Diluido 7 (11,626 min) cuyas condiciones de operación son de 10V y 100L/h.

También puede observarse que a medida que se aumenta tanto la diferencia de potencial como la velocidad de flujo, la concentración de iones cloruro al final de cada corrida (15 minutos) disminuye sustancialmente, siendo el porcentaje de reducción más bajo el de la solución de Diluido 7 (10V y 100L/h) al alcanzar un 87,4% (lo que corresponde con una concentración final de 415,1ppm Cl⁻); mientras que, el porcentaje de reducción más alto es el de la solución de Diluido 3 (30V y 300L/h) al alcanzar un 99,6% (lo que corresponde con una concentración final de 14ppmCl⁻).



La Tabla V.3, también muestra el tiempo necesario para llegar a una concentración de 500ppm de cloruros, que es lo que se cree valla a ser el límite futuro de este renglón. El aumento del tiempo es del orden de 34% con respecto al tiempo para llegar a los 1000ppm de concentración. Esto se traduce también en un aumento de los costos de operación.

V.4.) Curvas de Dureza obtenidas en la Desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria

Una vez realizadas todas las pruebas de desalación del agua de producción del campo La Victoria en el equipo electrodiálizador a distintas condiciones de operación, se procedió a determinar la dureza de cada una de las muestras tomadas en el compartimiento de Diluido en función del tiempo de operación empleando para ello el Método de Volumetría de Formación de Complejos. Los resultados obtenidos se muestran en el Anexo III.

En la Figura V.8 se pueden observar las curvas de dureza de cada una de las corridas realizadas, determinadas sólo al compartimiento donde se encuentra el agua de producción del campo La Victoria. En la figura mencionada se observa que en todas las corridas realizadas se obtiene el mismo comportamiento, es decir, a medida que transcurre el tiempo de operación la dureza del agua de producción va disminuyendo, hasta que se logra alcanzar alrededor de un 90% de reducción de los iones calcio y magnesio (expresados como CaCO_3 equivalentes) al final de la operación, en la mayoría de los casos.

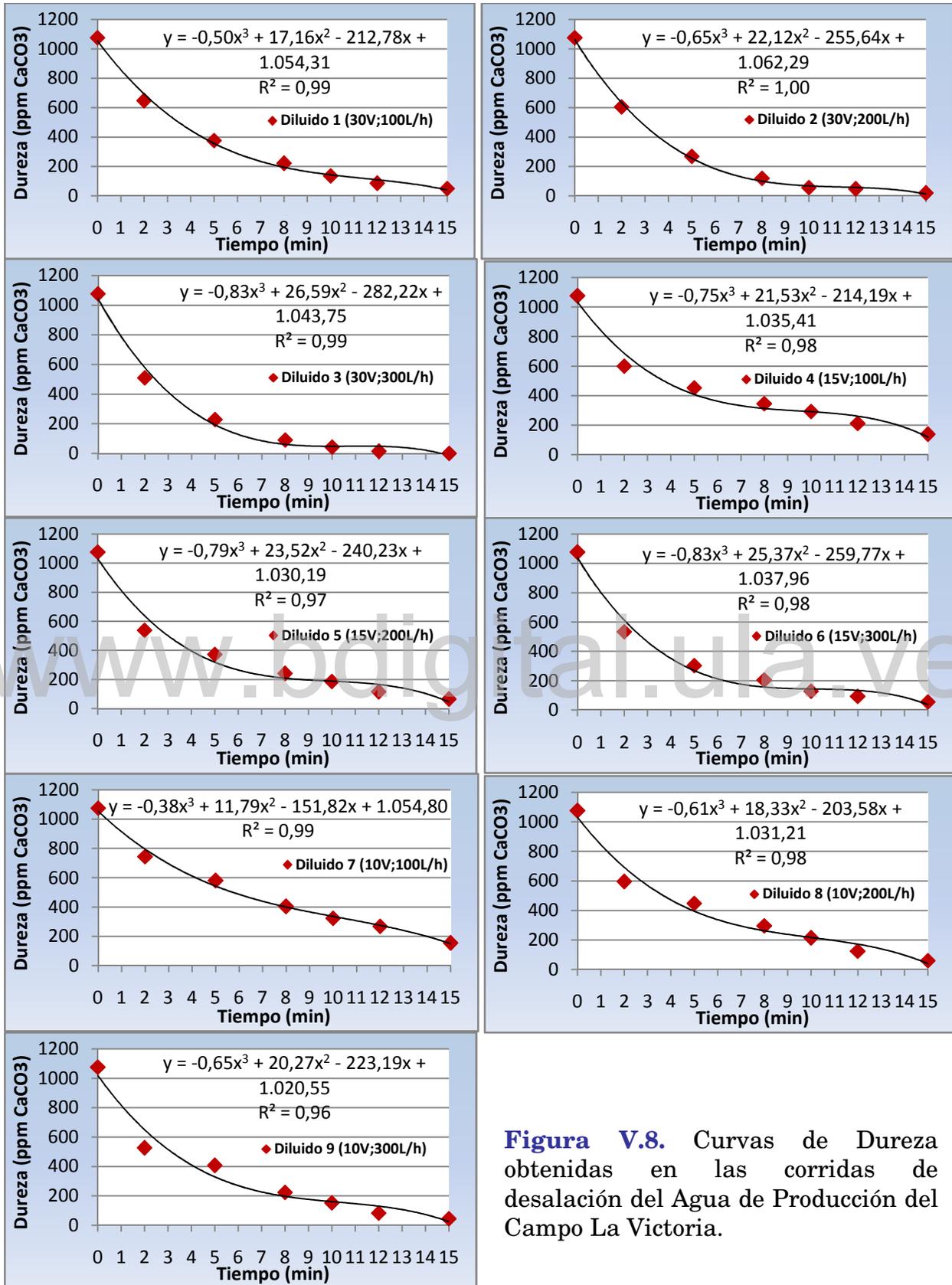
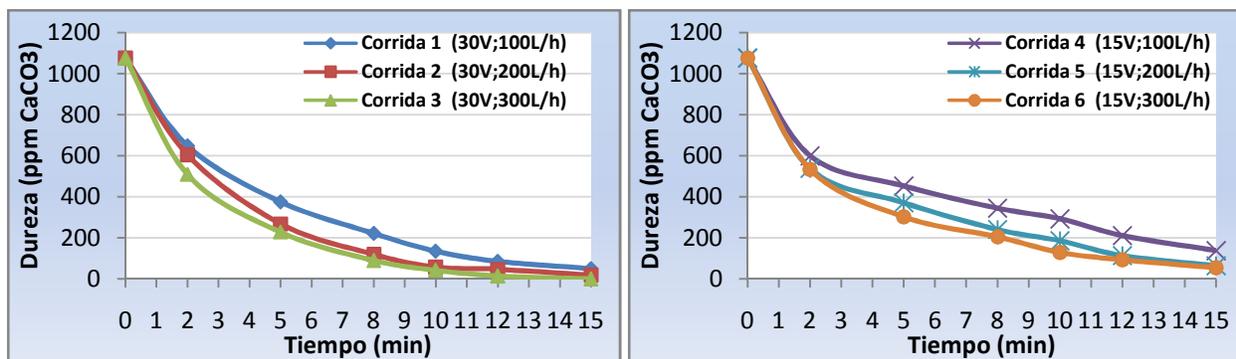


Figura V.8. Curvas de Dureza obtenidas en las corridas de desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria.

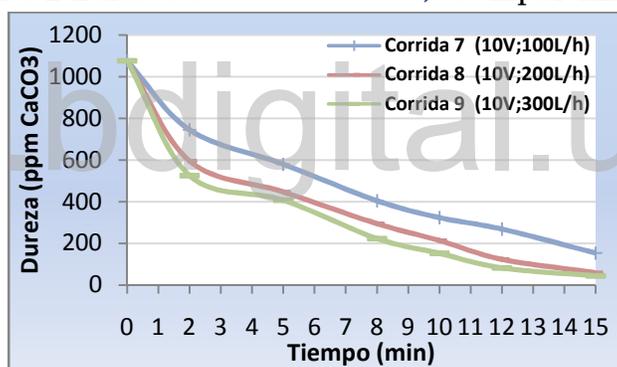


Si se comparan las curvas de dureza de las corridas realizadas a una misma diferencia de potencial (Figura V.9) se observa que ocurre mayor transferencia de los iones carbonato a medida que se incrementa la velocidad tangencial de flujo, comportamiento este que ya ha sido expuesto anteriormente al medir las conductividades de estas soluciones.



a) Compartimiento Diluido a 30V.

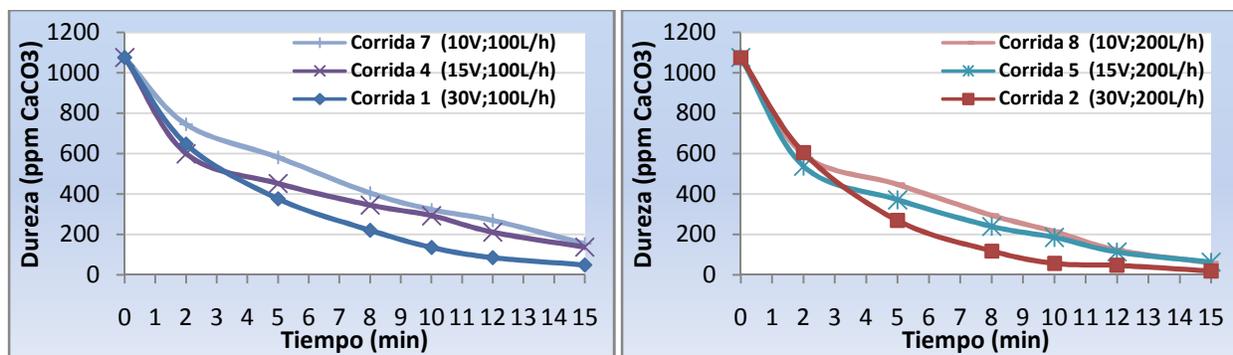
b) Compartimiento Diluido a 15V.



c) Compartimiento Diluido a 10V.

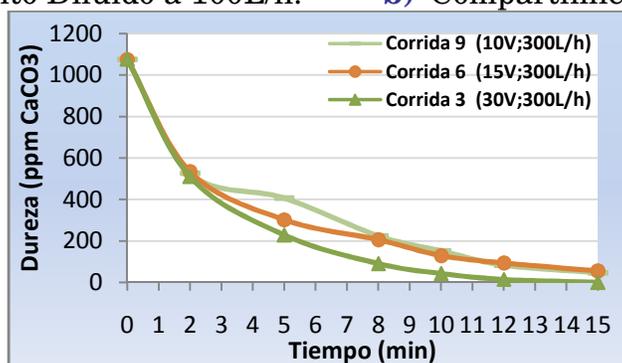
Figura V.9. Curvas de Dureza (ppm CaCO₃ equivalentes) de los compartimientos de Diluido operando a una diferencia de potencial constante y variando la velocidad tangencial de flujo.

De igual manera, si se comparan las curvas de dureza de las corridas realizadas a una misma velocidad tangencial de flujo (Figura V.10) se observa que ocurre mayor transferencia de los iones carbonato a medida que se incrementa la diferencia de potencial aplicada, también acorde con los resultados obtenidos al medir las conductividades de estas soluciones.



a) Compartimiento Diluido a 100L/h.

b) Compartimiento Diluido a 200L/h.



c) Compartimiento Diluido a 300L/h.

Figura V.10. Curvas de dureza (ppm CaCO_3 equivalentes) de los compartimientos de Diluido operando a velocidad tangencial de flujo constante y variando la diferencia de potencial.

Por otro lado, se determinó el porcentaje de reducción de la dureza del agua en estudio al final del proceso. Estos resultados se muestran en la Tabla V.4.

Tabla V.4. Resultados obtenidos en la determinación de la dureza del Agua de Producción del Campo La Victoria a distintas condiciones de operación.

Muestra	Estado	ppm CaCO_3 equivalentes	Reducción
Agua de Producción	Inicial	1076,2	-----
Diluido 1 (30V; 100L/h)	Final	50,0	95,4 %
Diluido 2 (30V; 200L/h)	Final	19,0	98,2 %
Diluido 3 (30V; 300L/h)	Final	0,0	100 %
Diluido 4 (15V; 100L/h)	Final	138,1	87,2 %
Diluido 5 (15V; 200L/h)	Final	64,3	94,0 %
Diluido 6 (15V; 300L/h)	Final	54,8	94,9 %
Diluido 7 (10V; 100L/h)	Final	154,8	85,6 %
Diluido 8 (10V; 200L/h)	Final	59,5	94,5 %
Diluido 9 (10V; 300L/h)	Final	45,2	95,8 %



Se observa claramente que la concentración de iones calcio y magnesio (componentes principales de la dureza en este caso) en las soluciones disminuye sustancialmente luego de ser tratadas empleando la técnica de electrodiálisis en un tiempo relativamente muy corto, como lo demuestra la Tabla V.4. También puede observarse que a medida que se aumenta tanto la diferencia de potencial como la velocidad tangencial de flujo, la concentración de iones carbonato al final del proceso disminuye significativamente, siendo el porcentaje de reducción más bajo 85,6% (concentración final de 154,8ppm CaCO_3) que corresponde a la solución Diluido 7 (10V y 100L/h); mientras que, el porcentaje de reducción más alto fue de 100% que corresponde con la solución Diluido 3 (30V y 300L/h) lo que implica que los iones carbonato fueron retirados por completo del agua de producción.

V.5.) Curvas de Calcio obtenidas en la Desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria

Al realizar todas las pruebas de desalación del agua de producción del campo La Victoria en el equipo electrodiálizador a distintas condiciones de operación, se procedió a determinar la concentración de iones calcio (Ca^{2+}) de cada una de las muestras tomadas en el compartimiento Diluido en función del tiempo de operación, empleando para ello el Método de Volumetría de Formación de Complejos. Los resultados obtenidos se muestran en el Anexo IV.

En la Figura V.11 se pueden observar las curvas de calcio para cada una de las corridas realizadas, sólo en el compartimiento Diluido donde se encuentra el agua de interés que es el agua de producción del campo La Victoria. En esta figura se observa el mismo comportamiento en todas las corridas realizadas; a medida que transcurre el tiempo de operación los iones calcio van disminuyendo progresivamente hasta que se alcanza aproximadamente un 90% de reducción de estos iones al final del proceso en la mayoría de los casos.

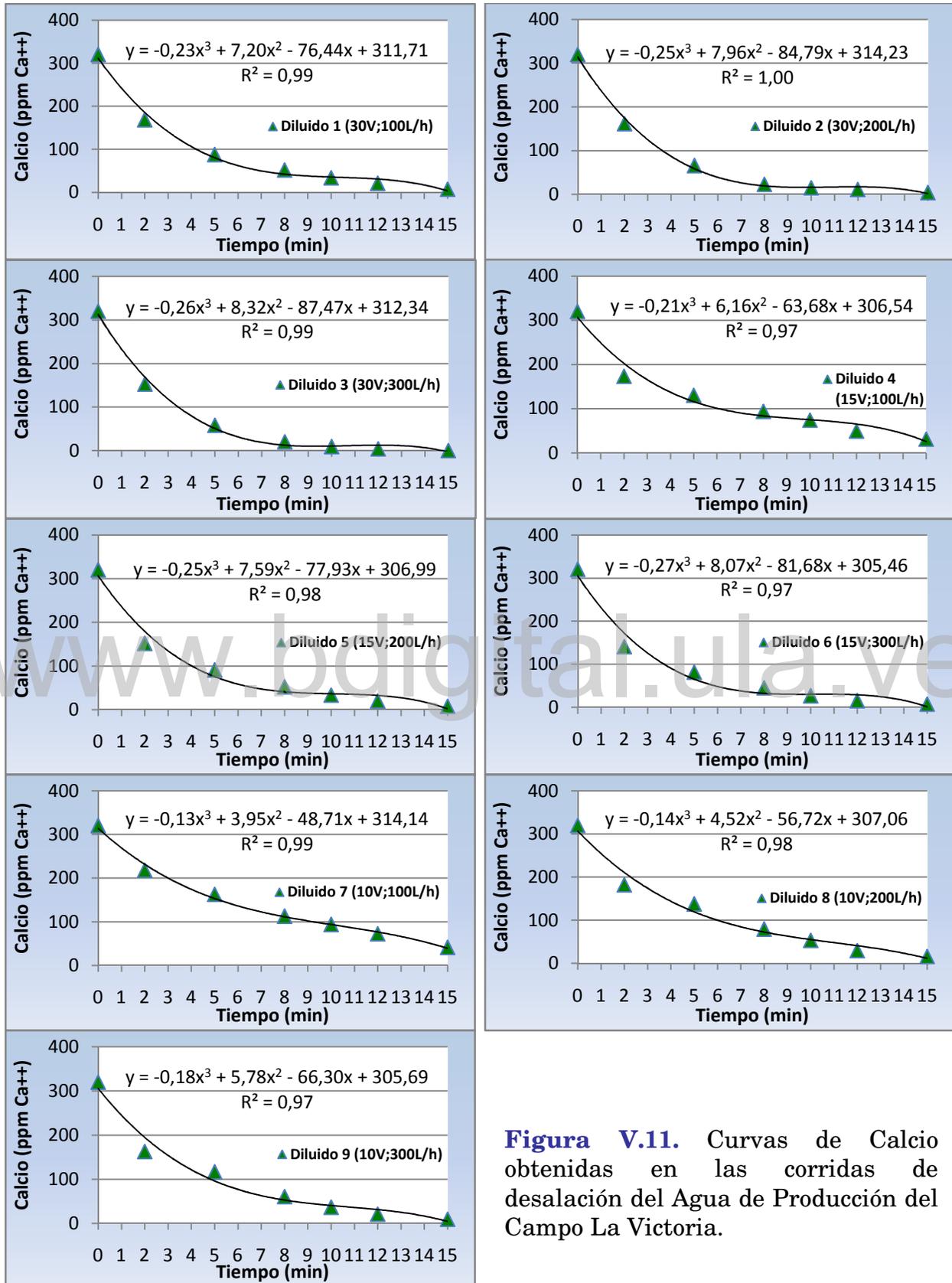
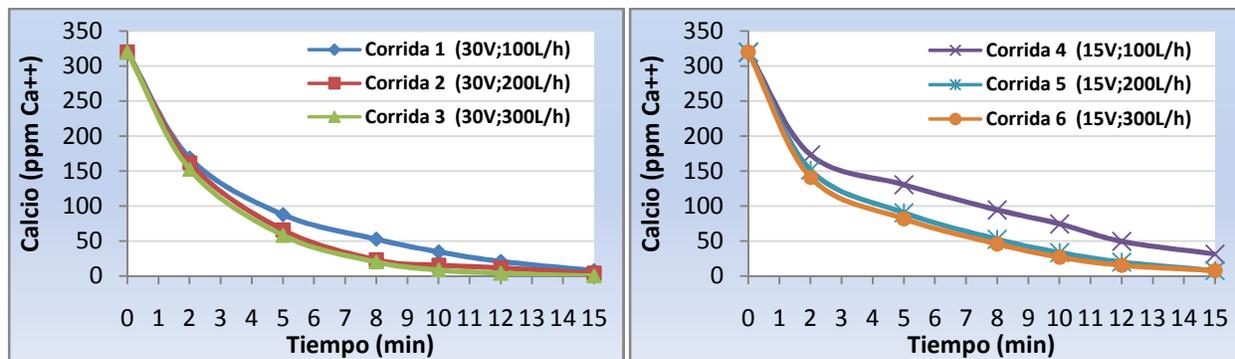


Figura V.11. Curvas de Calcio obtenidas en las corridas de desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria.

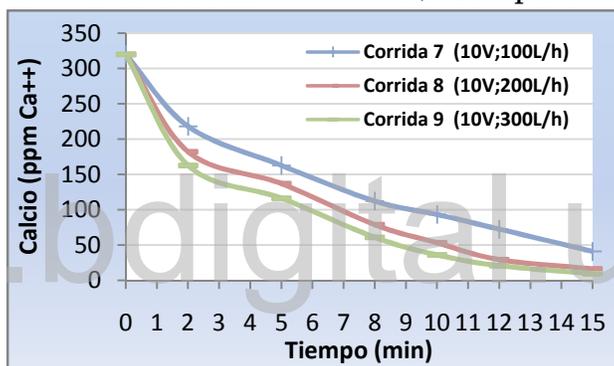


Si se comparan las curvas de calcio de las corridas realizadas a una misma diferencia de potencial (Figura V.12) se observa que ocurre mayor transferencia de estos iones a medida que se incrementa la velocidad tangencial de flujo, como se ha visto en casos anteriores.



a) Compartimiento Diluido a 30V.

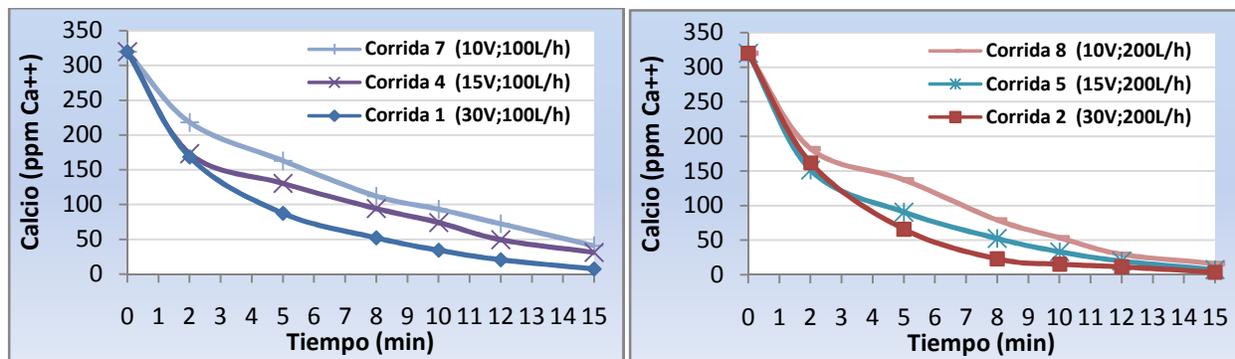
b) Compartimiento Diluido a 15V.



c) Compartimiento Diluido a 10V.

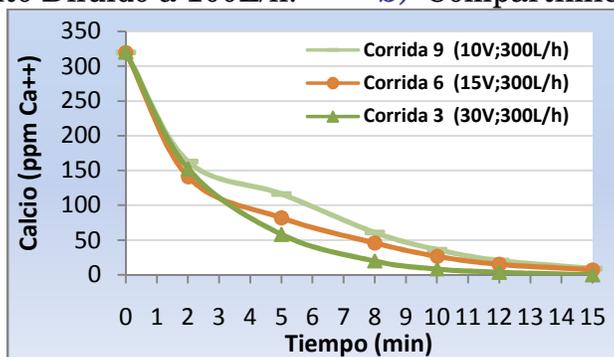
Figura V.12. Curvas de Calcio (Ca^{2+}) de los compartimientos de Diluido operando a una diferencia de potencial constante y variando la velocidad tangencial de flujo.

De igual manera, si se comparan las curvas de calcio de las corridas realizadas a una misma velocidad tangencial de flujo (Figura V.13) se observa que ocurre mayor transferencia de estos iones a medida que se incrementa la diferencia de potencial aplicada, también acorde con los resultados obtenidos con anterioridad.



a) Compartimiento Diluido a 100L/h.

b) Compartimiento Diluido a 200L/h.



c) Compartimiento Diluido a 300L/h.

Figura V.13. Curvas de Calcio (Ca^{2+}) de los compartimientos de Diluido operando a una velocidad tangencial de flujo constante y variando la diferencia de potencial.

Se determinó el porcentaje de reducción de estos iones al final del proceso, resultados éstos que se muestran a continuación, en la Tabla V.5.

Tabla V.5. Resultados obtenidos de la determinación de iones calcio realizadas al agua de producción del Campo la Victoria a distintas condiciones de operación.

Muestra	Estado	ppm Ca^{2+}	Reducción
Agua de Producción	Inicial	320,0	-----
Diluido 1 (30V; 100L/h)	Final	7,6	97,6 %
Diluido 2 (30V; 200L/h)	Final	3,8	98,8 %
Diluido 3 (30V; 300L/h)	Final	0,0	100 %
Diluido 4 (15V; 100L/h)	Final	31,4	90,2%
Diluido 5 (15V; 200L/h)	Final	7,6	97,6 %
Diluido 6 (15V; 300L/h)	Final	7,6	97,6 %
Diluido 7 (10V; 100L/h)	Final	41,0	87,2 %
Diluido 8 (10V; 200L/h)	Final	16,2	94,9 %
Diluido 9 (10V; 300L/h)	Final	9,5	97,0 %



Se observa claramente, en la Tabla V.5, que la concentración de iones calcio en las soluciones disminuye sustancialmente luego de ser tratadas empleando la técnica de electrodiálisis en un tiempo relativamente corto. También puede observarse que el porcentaje de reducción más bajo es de 87,2% (concentración final de 41,0ppmCa²⁺) que corresponde a la solución Diluido 7 (10V y 100L/h); mientras que, el porcentaje de reducción más alto fue de 100% que corresponde con la solución Diluido 3 (30V y 300L/h) lo que implica que los iones calcio fueron retirados por completo del agua de producción. No obstante, es importante hacer notar que en repetidas ocasiones se llegó a una misma concentración final de iones calcio, tal es el caso de las soluciones Diluido 1, Diluido 5 y Diluido 6. En los casos del Diluido 1 y el Diluido 5 se puede deber a que las condiciones de operación producen una transferencia similar, en el caso 1 hay 30V y 100L/h y en el caso 5, hay 15V pero 200L/h, una variable puede compensar la otra. En el caso del Diluido 6 podría haber una limitante en la transferencia al aumentar la velocidad a 15V de 200L/h a 300L/h, sin embargo, habría que estudiar más profundamente el caso para sacar conclusiones definitivas.

V.6.) Curvas de Magnesio obtenidas en la Desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria

Una vez realizadas todas las pruebas de desalación del agua de producción de Campo La Victoria en el equipo electrodiálizador a distintas condiciones de operación, se procedió a determinar la concentración de iones magnesio (Mg²⁺) de cada una de las muestras tomadas en el compartimiento Diluido en función del tiempo de operación. Los resultados obtenidos se muestran en el Anexo V.

En la Figura V.14 se pueden observar las curvas de magnesio para cada una de las corridas realizadas, sólo en el compartimiento de interés que es donde se encuentra el agua de producción del campo La Victoria. En la figura mencionada se observa que en todas las corridas realizadas se obtiene el mismo comportamiento, es decir, a medida que transcurre el tiempo de operación los iones magnesio van disminuyendo progresivamente.

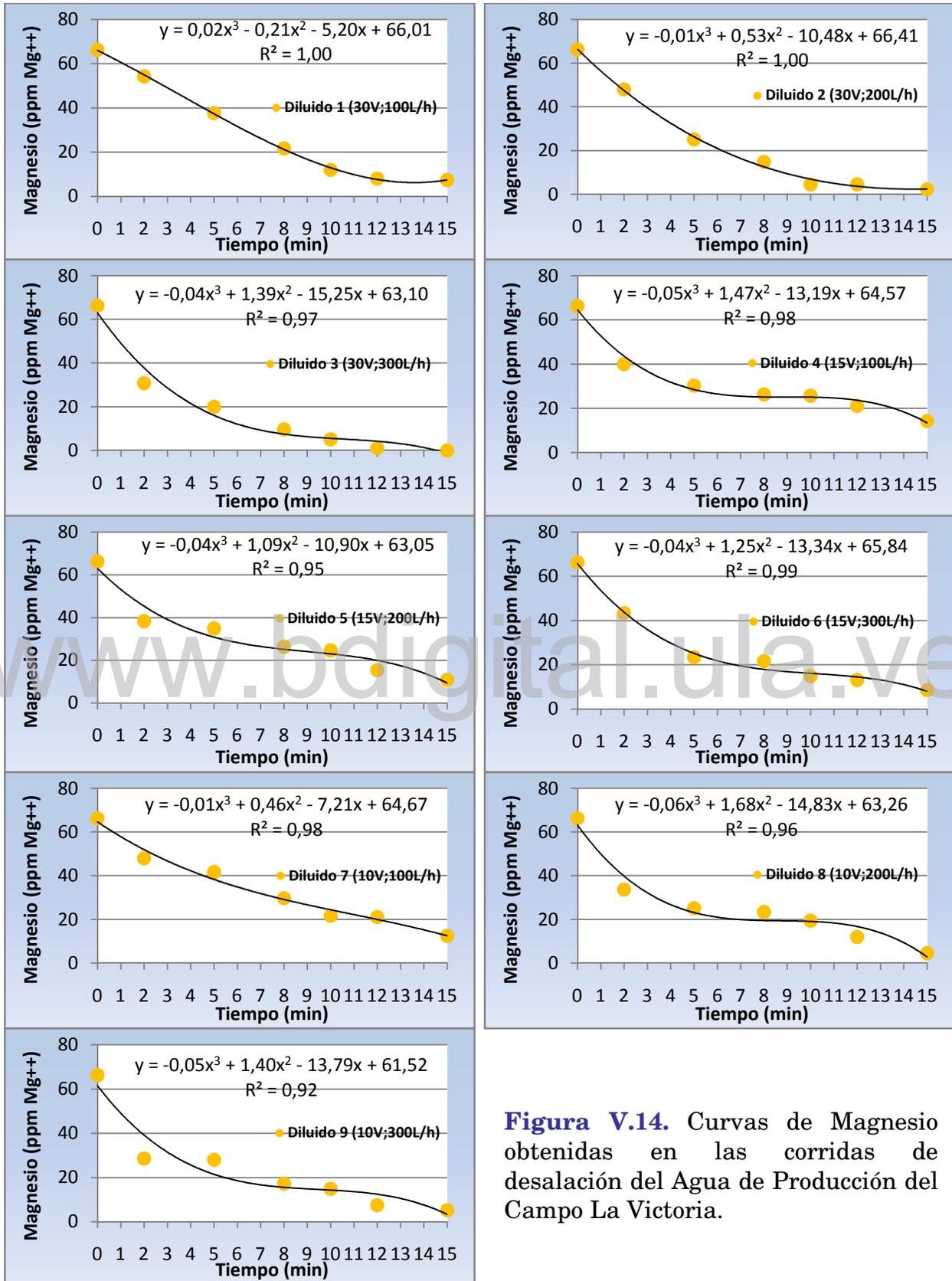


Figura V.14. Curvas de Magnesio obtenidas en las corridas de desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria.



A diferencia de los casos anteriores, en la determinación de los iones cloruro, dureza del agua e iones calcio, en la determinación de los iones magnesio no se observa una clara tendencia de la disminución de los iones si se comparan las soluciones de las corridas realizadas a una misma diferencia de potencial o a una misma velocidad tangencial de flujo, como se puede observar en la Figura V.15. Esto puede deberse a errores en la determinación de estos iones.

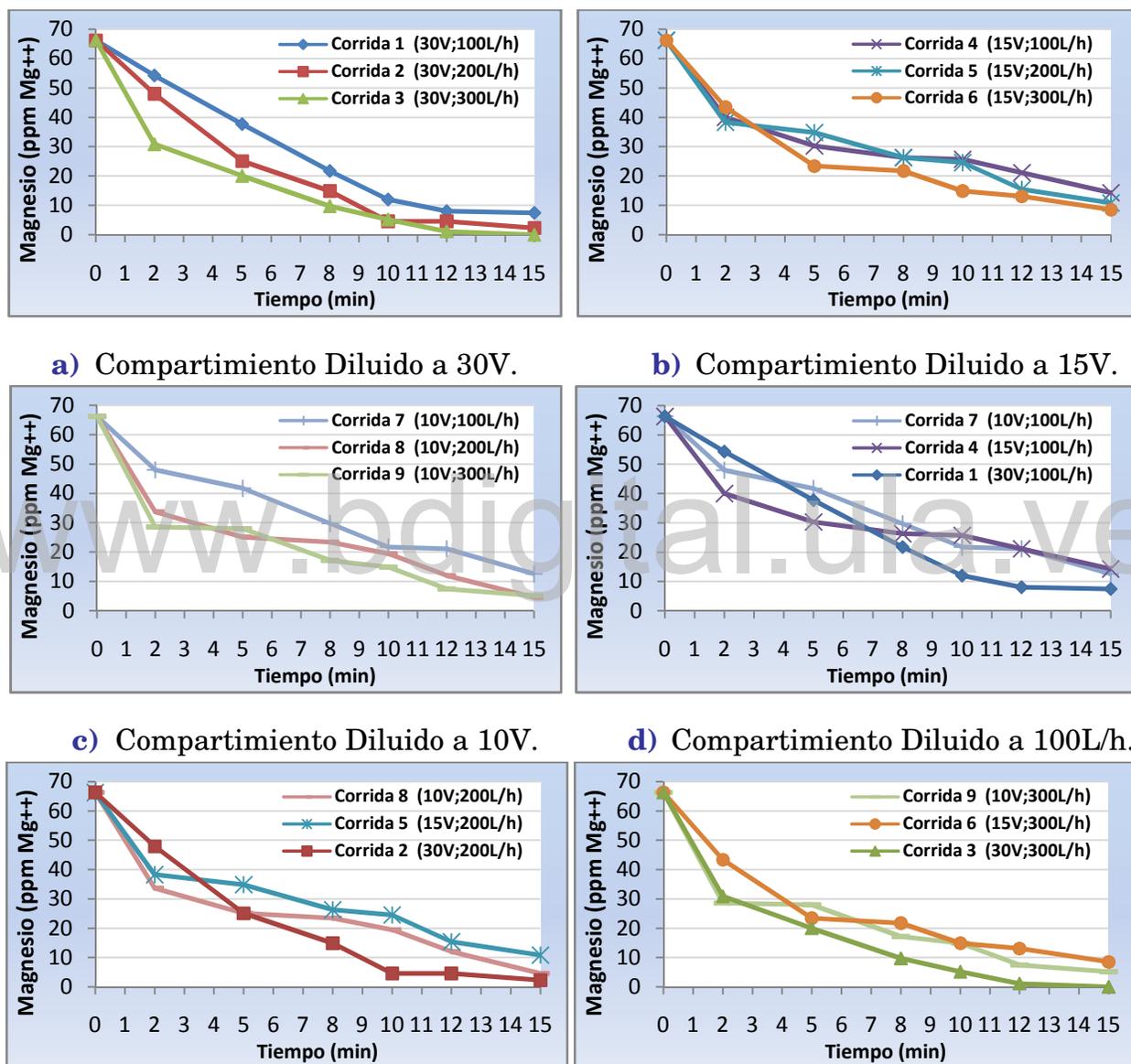


Figura V.15. Curvas de Magnesio (Mg^{2+}) de los compartimientos de Diluido operando a diferencia de potencial constante (a, b y c) y a velocidad tangencial de flujo constante (d, e y f).



Se determinó el porcentaje de reducción de estos iones al final del proceso, resultados éstos que se muestran a continuación, en la Tabla V.6.

Tabla V.6. Resultados obtenidos de la determinación de iones magnesio realizada al Agua de Producción del Campo la Victoria a distintas condiciones de operación.

Muestra	Estado	ppm Mg ²⁺	Reducción
Agua de Producción	Inicial	66,3	-----
Diluido 1 (30V; 100L/h)	Final	7,4	88,8 %
Diluido 2 (30V; 200L/h)	Final	2,3	96,6 %
Diluido 3 (30V; 300L/h)	Final	0,0	100 %
Diluido 4 (15V; 100L/h)	Final	14,3	78,4 %
Diluido 5 (15V; 200L/h)	Final	10,9	83,6 %
Diluido 6 (15V; 300L/h)	Final	8,6	87,1 %
Diluido 7 (10V; 100L/h)	Final	12,6	81,0 %
Diluido 8 (10V; 200L/h)	Final	4,6	93,1 %
Diluido 9 (10V; 300L/h)	Final	5,1	92,2 %

Se observa claramente, en la Tabla V.6, que la concentración de iones magnesio en las soluciones disminuye sustancialmente luego de ser tratadas empleando la técnica de electrodiálisis en un tiempo relativamente corto. También puede observarse que el porcentaje de reducción más bajo es de 78,4% (concentración final de 14,3ppmMg²⁺) que corresponde a la solución Diluido 4 (15V y 100L/h); mientras que, el porcentaje de reducción más alto fue de 100% que corresponde con la solución Diluido 3 (30V y 300L/h) lo que implica que los iones magnesio fueron retirados por completo del agua de producción. Este comportamiento no se corresponde con los resultados obtenidos con anterioridad, por lo que se infiere que pudo haber errores en la determinación de los iones magnesio, cuya determinación es indirecta ya que depende de la dureza total y de la determinación del calcio (es la resta de los dos, dureza menos calcio).

V.7.) Consumo Energético Total en la Electrodiálisis

En el proceso de electrodiálisis, la energía que se consume se debe principalmente a dos factores: consumo energético por parte de las bombas que son las responsables de hacer que las soluciones se muevan a través de todo el circuito y consumo energético debido al proceso de separación propiamente dicho, en el cual se



aplica una diferencia de potencial que implica un consumo de energía. La variación de la intensidad de corriente se registró en función del tiempo para cada una de las corridas realizadas en el electrodiализador con el objetivo de calcular el consumo energético debido al proceso de separación, tal como se describió en el Capítulo III (apartado IV.4.6). Los resultados se muestran en el Anexo VI.

Al inicio de cada una de las experiencias realizadas se experimenta un ligero aumento de la intensidad de la corriente en función del tiempo y luego de cierto tiempo esta intensidad de la corriente comienza a disminuir (Figura V.17). Esto se debe a que al inicio del proceso, la mayor resistencia al paso de la corriente se encuentra en el compartimiento Concentrado (Solución de NaCl de 500ppm de concentración) el cual experimenta un aumento de sus iones en solución a medida que transcurre el tiempo por lo que la resistencia al paso de la corriente comienza a disminuir, lo que se traduce en un aumento de la intensidad de corriente a voltaje constante, cumpliendo con la Ley de Ohm ($V=I.R$). Sin embargo, luego de cierto tiempo, la mayor resistencia al paso de la corriente se encuentra en el compartimiento Diluido (Agua de Producción del Campo La Victoria) el cual experimenta una disminución de sus iones en solución a medida que transcurre el tiempo por lo que la resistencia al paso de la corriente comienza a aumentar, lo que se traduce finalmente en una disminución de la intensidad de corriente a voltaje constante (Figura V.16). El comportamiento anterior lleva a la existencia de un máximo en la curva, en el momento de menor resistencia de ambos compartimentos, diluido y concentrado.

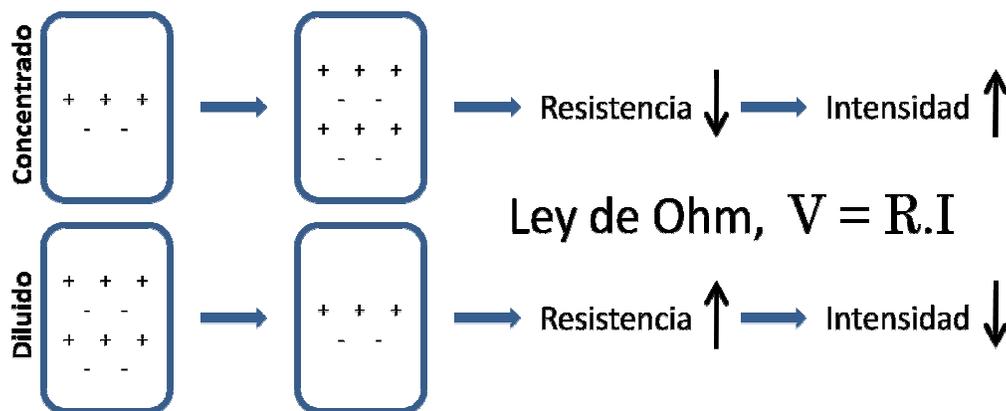


Figura V.16. Aplicación de la Ley de Ohm.

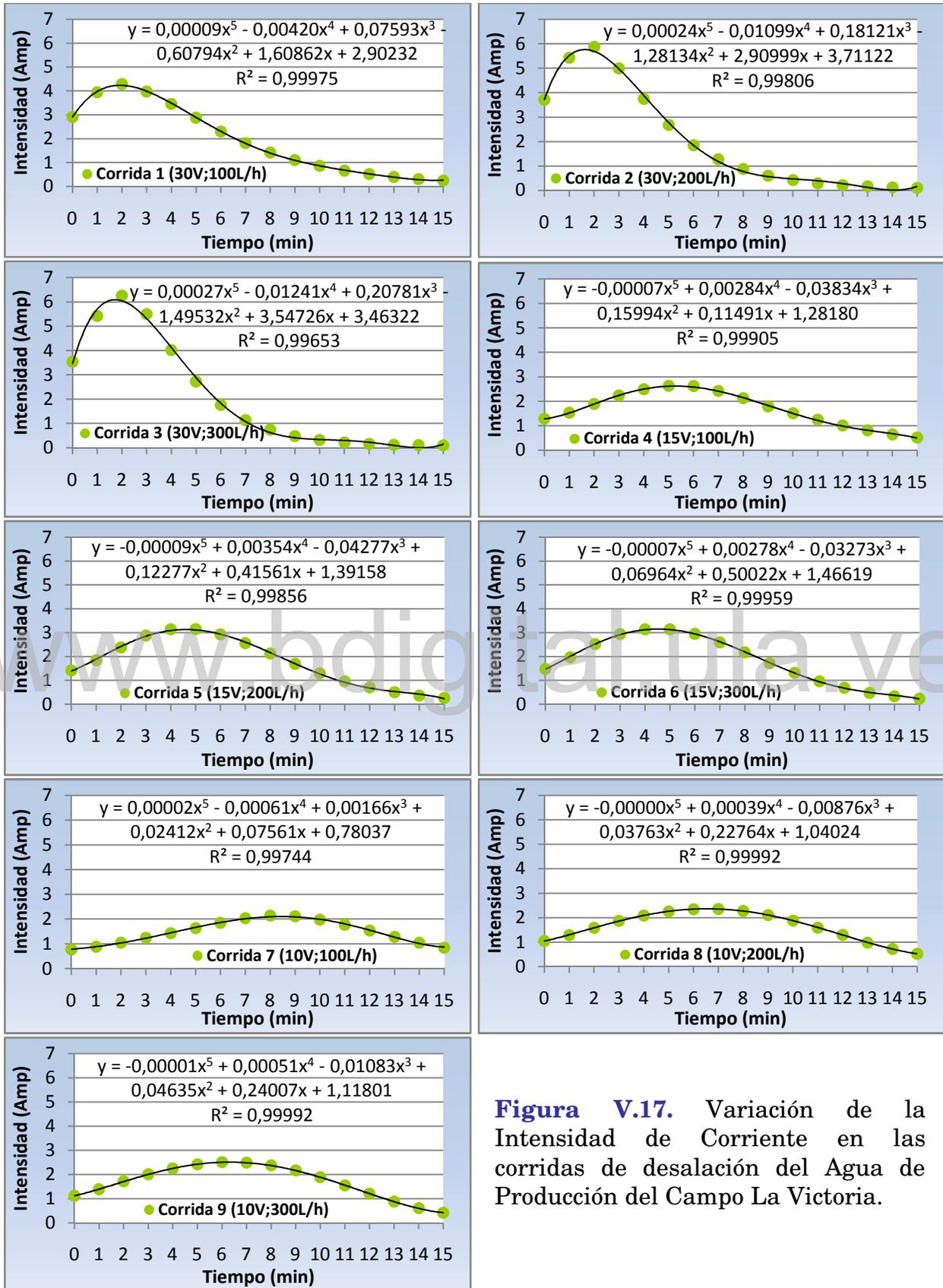


Figura V.17. Variación de la Intensidad de Corriente en las corridas de desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria.



En la Tabla V.7. se observan los resultados obtenidos para el consumo energético en cada una de las corridas realizadas en el electrodiálizador.

Tabla V.7. Consumo Energético de las distintas corridas de desalación del Agua de Producción del Campo la Victoria.

Muestra	Energía de Bombeo (W.h/L)*	Energía de Separación (W.h/L)	Energía Total (W.h/L)	Costo (Bs.F/L)
Corrida 1	16,92	8,64	25,56	0,0019
Corrida 2	16,92	5,37	22,29	0,0017
Corrida 3	16,92	6,67	23,59	0,0018
Corrida 4	16,92	3,16	20,08	0,0015
Corrida 5	16,92	3,90	20,82	0,0016
Corrida 6	16,92	3,96	20,88	0,0016
Corrida 7	16,92	1,14	18,06	0,0014
Corrida 8	16,92	2,19	19,10	0,0015
Corrida 9	16,92	1,44	18,36	0,0014

* La energía de bombeo es igual para todas las corridas realizadas, ya que la potencia de las bombas es constante para cada caso y operan durante el mismo tiempo. Las ecuaciones usadas para el cálculo se encuentran en el Capítulo de Metodología Experimental.

Los resultados de la Tabla V.7 se ilustran también en la Figura V.18 donde se observa que a medida que la diferencia de potencial aplicada en cada una de las corridas realizadas en el electrodiálizador aumenta, también lo hace el consumo energético de las mismas.

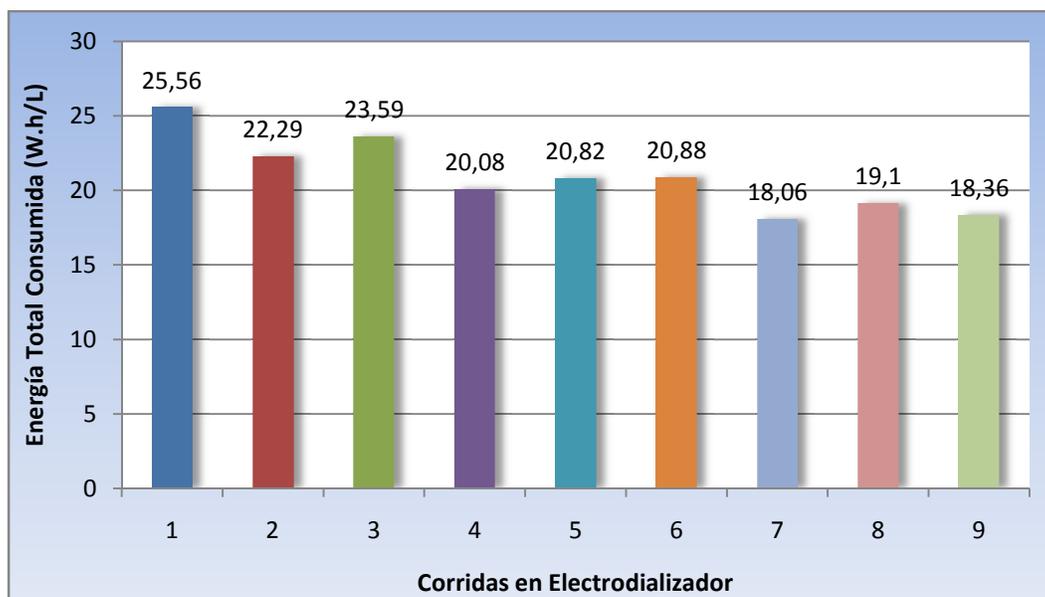


Figura V.18. Consumo Energético de las corridas de desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria.



Ahora bien, en la Tabla V.8. se observan los resultados obtenidos para el consumo energético en cada una de las corridas realizadas en el electrodiálizador una vez que fue posible alcanzar los 1000ppm Cl⁻ establecidos en el Decreto 883, a fin de conocer la energía consumida hasta este límite de concentración.

Tabla V.8. Consumo Energético de las distintas corridas de desalación del Agua de Producción del Campo la Victoria para alcanzar 1000ppm de concentración de cloruros.

Muestra	Energía de Bombeo (W.h/L)*	Energía de Separación (W.h/L)	Energía Total (W.h/L)	Costo (Bs.F/L)
Corrida 1	5,877	5,246	11,123	0,0009
Corrida 2	5,407	5,240	10,648	0,0008
Corrida 3	5,339	5,247	10,586	0,0008
Corrida 4	6,839	2,495	9,334	0,0007
Corrida 5	6,342	2,458	8,800	0,0007
Corrida 6	6,269	2,426	8,694	0,0007
Corrida 7	7,509	1,393	8,902	0,0007
Corrida 8	6,900	1,556	8,456	0,0006
Corrida 9	6,769	1,536	8,305	0,0006

* La energía de bombeo fue calculada tomando en cuenta tanto el tiempo para que las membranas se impregnen de solución (15min) como el tiempo adicional que toma la desalinización para alcanzar 1000ppm de concentración de cloruros.

Los resultados de la Tabla V.8 se ilustran también en la Figura V.19 donde se observa el mismo comportamiento mostrado anteriormente, donde a medida que la diferencia de potencial aplicada en cada una de las corridas realizadas en el electrodiálizador aumenta, también lo hace el consumo energético de las mismas.

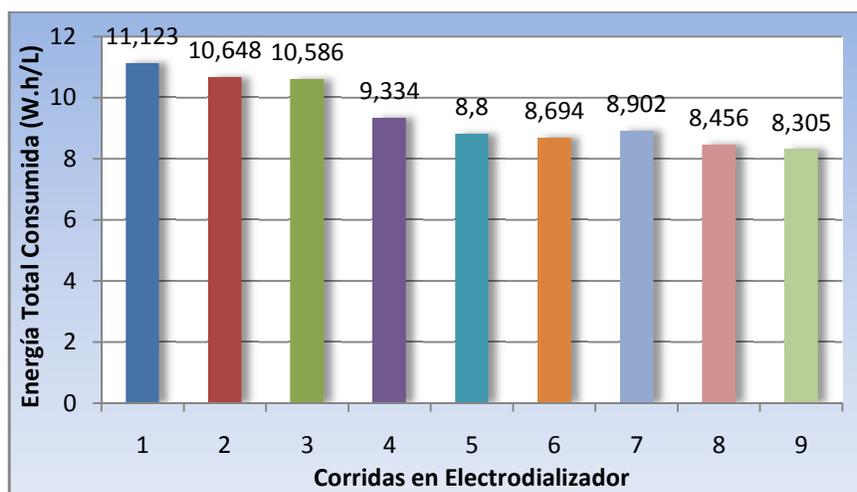


Figura V.19. Consumo Energético de las corridas de desalación del Agua de Producción del Campo La Victoria, al alcanzar 1000ppm de concentración de cloruros.



CONCLUSIONES

Una vez realizado el tratamiento del agua de producción a distintas condiciones de operación, se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

- ♦ En el tratamiento del Agua de Producción del Campo La Victoria se constató que a medida que se incrementa la diferencia de potencial aplicada se aumenta significativamente la transferencia de los iones en solución.
- ♦ En el tratamiento del Agua de Producción del Campo La Victoria se verificó que la transferencia de iones en solución aumenta sustancialmente a medida que se incrementa la velocidad tangencial de flujo, sin embargo, se observó que se obtienen resultados similares operando tanto a 200L/h como a 300L/h al aplicar una diferencia de potencial constante.
- ♦ La electrodiálisis es una técnica de separación muy eficiente en el tratamiento de aguas de producción con mediano contenido de cloruros, alcanzando concentraciones inferiores a los 1000ppm reglamentarios en un tiempo relativamente corto. Aplicando una diferencia de potencial de 30V y una velocidad tangencial de 300 L/h, se logró alcanzar los 1000ppm reglamentarios en un tiempo de 3,932 minutos y, posteriormente se llegó a una concentración final de 14ppm Cl⁻, lo que representa un 99,6% de reducción de estos iones.
- ♦ Empleando la técnica de electrodiálisis fue posible reducir la dureza del agua de producción (ppm CaCO₃ equivalente) en solución, alcanzando en la mayoría de los casos estudiados un porcentaje de reducción superior al 90%.
- ♦ Para los casos estudiados el consumo energético es bajo, por lo que el proceso es económico. El consumo más bajo se obtuvo operando a 10V y 100L/h, donde el consumo fue de 18,06 W.h/L, que representa un costo de 0,0014 BsF/L.



RECOMENDACIONES

Con el objetivo de mejorar el estudio realizado se hacen las siguientes recomendaciones:

- ♦ Utilizar otro método para determinar la concentración de los iones calcio y magnesio, como Absorción Atómica, a fin de comparar con los resultados obtenidos. En lo que respecta a la concentración de estos iones deben hacerse más pruebas.
- ♦ Realizar estudios en aguas de producción de distinta naturaleza para poder evaluar la flexibilidad del proceso.
- ♦ Utilizar efluentes diferentes al agua de producción, como las derivadas de la galvanoplastia por citar un ejemplo.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SCOTT, K. *Handbook of Industrial Membranes*. Second Edition. Elsevier Advanced Technology. Oxford, 1998.
- [2] CÁRDENAS, A. *Membranas Generalidades*. Cuaderno FIRP #450. Universidad de Los Andes. Mérida, 1995.
- [3] BULLÓN, J. *Membranas usos Industriales*. Tesis. Universidad de Los Andes. Mérida, 1996.
- [4] OCHOA, J. *Electrosíntesis y Electrodiálisis (Fundamentos, aplicaciones tecnológicas y tendencias)*. McGraw-Hill. Madrid, 1996.
- [5] SANDEAUX, J.; SANDEAUX, R. *Procesos con Membranas Intercambiadoras de Iones*. Cuaderno FIRP #455. Universidad de Los Andes. Mérida, 1995.
- [6] RAUCQ, D. *Membranas de Intercambio Iónico y Técnicas Electromembranarias*. Cuaderno FIRP #456. Universidad de Los Andes. Mérida, 1995.
- [7] SANDEAUX, J.; SANDEAUX, R. *Las Membranas Intercambiadoras de Iones*. Cuaderno FIRP #454. Universidad de Los Andes. Mérida, 1995.
- [8] CÁRDENAS, A. *El Mundo de Las Membranas*. Cuaderno FIRP #453. Universidad de Los Andes. Mérida, 2007.
- [9] KIRK-OTHMER. *Enciclopedia de Tecnología Química*. Tomo 6. Primera Edición en Español. México, 1961.
- [10] Fundación Chile. El agua, disponibilidad y uso.
<http://www.chilepaisforestal.cl/Profesores/pdf/Fichaagua.pdf>. Consulta: 10/04/08
- [11] HERNÁNDEZ, A. *Depuración de Aguas Residuales*. Escuela Técnica de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. España, 1992.
- [12] MONTOYA, R. *Contaminación de Aguas*. Universidad de Los Andes. Mérida, 2000.
- [13] Universidad de Sevilla. Escuela Universitaria Politécnica. Tipos de Aguas Residuales Industriales.
http://www.grupotar.org/master/ponencias/modulo1/ponencias_modulo01_master_04-06/ari_generalidades.pdf. Consulta: 01/03/09



- [14] CRITES, R.; TCHOBANOGLIOUS, G. *Tratamiento de Agua Residuales en pequeñas poblaciones*. McGraw-Hill. Colombia, 2004.
- [15] LAFUENTE, E.; ZAPICO, E.; REYES, N.; ZAPICO, J. *Tratado del Agua: Control de la Contaminación y Depuración*. Editorial Santa María, C.A. Mérida, 2000.
- [16] American Water Works Association. Research Foundation. *Tratamiento del agua por Procesos de Membrana*. McGraw-Hill. España, 1998.
- [17] GIBSON U.; SINGER R. *Manual de los Pozos Pequeños*. Universidad de Minnesota. Editorial Limusa, S.A. México, 1974.
- [18] SIRIVEDHIN, T.; MCCUE, J.; DALLBAUMAN, L. *Reclaiming produced water for beneficial use: salt removal by electrodialysis*. Journal of Membrane Science. N° 243. Páginas 335 – 343. 2004.
- [19] MEDINA, I. *Tratamiento de Aguas de Producción con Electrodialisis*. Universidad de Los Andes. Tesis de Pregrado. Mérida, 2007.
- [20] Universidad de Sevilla. Escuela Universitaria Politécnica. Método de *MOHR*.
http://www.bonatura.com/2.01.18.11_1r.html. Consulta: 10/04/08
- [21] Universidad de Oviedo. Experimentación en Química. Determinación de la Dureza del Agua.
http://www.uniovi.es/QFAnalitica/trans/ExpquimDimas/PRACT_4_Dureza_del_Agua.pdf.
Consulta: 04/02/09



ANEXO I

DESALACIÓN DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO LA VICTORIA.

Tabla A.1. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 30V y una velocidad tangencial de 100 L/h. Primera Experiencia (Corrida 1:1).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,1	20,7	0,884	21,4
2	6,7	21,4	2,77	21,5
5	3,84	21,9	5,97	21,8
8	1,848	22,3	7,72	22,1
10	1,115	22,4	8,62	22,3
12	0,642	22,4	9,04	22,4
15	0,273	22,6	9,34	22,4

Tabla A.2. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 30V y una velocidad tangencial de 100 L/h. Segunda Experiencia (Corrida 1:2).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,14	20,7	0,855	21,4
2	6,62	21,4	3,01	21,4
5	3,71	21,7	6,25	21,7
8	1,747	21,9	7,96	21,8
10	1,036	21,9	8,76	22,1
12	0,590	21,9	9,13	22,1
15	0,243	21,9	9,40	22,1

Tabla A.3. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 30V y una velocidad tangencial de 100 L/h. Promedio (Corrida 1).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,120	20,7	0,870	21,4
2	6,660	21,4	2,890	21,5
5	3,775	21,8	6,110	21,8
8	1,798	22,1	7,840	22,0
10	1,076	22,2	8,690	22,2
12	0,616	22,2	9,085	22,3
15	0,258	22,3	9,370	22,3



Tabla A.4. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 30V y una velocidad tangencial de 200 L/h. Primera Experiencia (Corrida 2:1).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,18	21,7	0,882	22,1
2	5,79	22,4	4,05	22,4
5	2,23	23,0	7,74	22,8
8	0,673	23,3	9,03	23,2
10	0,281	23,9	9,26	23,5
12	0,1183	23,9	9,42	23,5
15	0,0355	23,9	9,49	23,6

Tabla A.5. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 30V y una velocidad tangencial de 200 L/h. Segunda Experiencia (Corrida 2:2).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,09	20,1	0,871	21,5
2	6,03	20,8	3,63	21,5
5	2,51	21,4	7,50	21,2
8	0,827	21,9	8,95	21,7
10	0,382	22,0	9,28	21,8
12	0,1718	22,0	9,36	21,8
15	0,054	22,1	9,60	21,9

Tabla A.6. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 30V y una velocidad tangencial de 200 L/h. Promedio (Corrida 2).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,135	20,9	0,877	21,8
2	5,910	21,6	3,840	22,0
5	2,370	22,2	7,620	22,0
8	0,750	22,6	8,990	22,5
10	0,332	23,0	9,270	22,7
12	0,145	23,0	9,390	22,7
15	0,045	23,0	9,545	22,8



Tabla A.7. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 30V y una velocidad tangencial de 300 L/h. Primera Experiencia (Corrida 3:1).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,02	20,2	0,873	20,7
2	5,76	20,7	3,81	20,8
5	1,978	20,9	7,71	21,0
8	0,542	21,0	9,11	21,1
10	0,220	21,2	9,37	21,1
12	0,0863	21,2	9,45	21,1
15	0,0346	21,1	9,50	21,1

Tabla A.8. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 30V y una velocidad tangencial de 300 L/h. Segunda Experiencia (Corrida 3:2).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,22	20,4	0,875	21,3
2	5,86	21,4	3,80	21,4
5	2,04	21,9	7,79	22,0
8	0,545	22,3	9,10	22,3
10	0,215	22,4	9,46	22,3
12	0,0853	22,4	9,50	22,3
15	0,0342	22,8	9,54	22,3

Tabla A.9. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 30V y una velocidad tangencial de 300 L/h. Promedio (Corrida 3).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,120	20,3	0,874	21,0
2	5,810	21,1	3,805	21,1
5	2,009	21,4	7,750	21,5
8	0,554	21,7	9,105	21,7
10	0,218	21,8	9,415	21,7
12	0,086	21,8	9,475	21,8
15	0,034	22,0	9,520	21,7



Tabla A.10. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 15V y una velocidad tangencial de 100 L/h. Primera Experiencia (Corrida 4:1).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,16	20,6	0,893	20,8
2	7,49	20,8	1,685	20,8
5	5,90	20,9	3,83	20,9
8	3,80	21,1	6,02	21,0
10	2,59	21,1	7,17	21,0
12	1,634	21,1	7,92	21,1
15	0,884	21,1	8,68	20,9

Tabla A.11. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 15V y una velocidad tangencial de 100 L/h. Segunda Experiencia (Corrida 4:2).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,19	20,8	0,88	21,2
2	7,75	21,2	1,722	21,4
5	6,05	21,8	3,88	21,6
8	3,86	22,1	6,15	22,1
10	2,69	22,1	7,35	22,1
12	1,715	22,2	8,16	22,1
15	0.892	22,1	8,82	22,1

Tabla A.12. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 15V y una velocidad tangencial de 100 L/h. Promedio (Corrida 4).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,175	20,7	0,887	21,0
2	7,620	21,0	1,704	21,1
5	5,975	21,4	3,885	21,3
8	3,830	21,6	6,085	21,6
10	2,640	21,6	7,260	21,6
12	1,675	21,7	8,040	21,6
15	0,888	21,6	8,750	21,5



Tabla A.13. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 15V y una velocidad tangencial de 200 L/h. Primera Experiencia (Corrida 5:1).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,21	20,7	0,872	21,7
2	7,42	21,7	2,07	21,9
5	5,11	22,2	4,76	22,3
8	2,61	22,5	7,23	22,3
10	1,424	22,6	8,29	22,4
12	0,781	22,7	8,86	22,4
15	0,33	22,8	9,24	22,6

Tabla A.14. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 15V y una velocidad tangencial de 200 L/h. Segunda Experiencia (Corrida 5:2).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,18	20,1	0,878	20,6
2	7,50	20,6	1,874	20,6
5	5,39	21,1	4,47	21,0
8	2,95	21,3	6,94	21,3
10	1,688	21,4	8,15	21,4
12	0,956	21,6	8,75	21,6
15	0,412	21,6	9,21	21,7

Tabla A.15. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 15V y una velocidad tangencial de 200 L/h. Promedio (Corrida 5).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,195	20,4	0,875	21,2
2	7,460	21,2	1,972	21,3
5	5,250	21,7	4,615	21,7
8	2,780	21,9	7,085	21,8
10	1,556	22,0	8,220	21,9
12	0,869	22,2	8,805	22,0
15	0,371	22,2	9,225	22,2



Tabla A.16. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 15V y una velocidad tangencial de 300 L/h. Primera Experiencia (Corrida 6:1).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,06	21,2	0,873	21,9
2	7,29	22,2	2,09	22,0
5	5,13	22,2	4,81	22,1
8	2,74	2,4	7,21	22,4
10	1,49	22,5	8,27	22,7
12	0,79	22,9	8,90	22,7
15	0,316	23,2	9,38	22,9

Tabla A.17. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 15V y una velocidad tangencial de 300 L/h. Segunda Experiencia (Corrida 6:2).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	8,92	19,8	0,859	20,2
2	7,31	20,1	1,94	20,2
5	5,16	20,4	4,69	20,4
8	2,70	20,7	7,14	20,7
10	1,447	20,9	8,22	20,9
12	0,791	20,9	8,91	22,1
15	0,325	21,2	9,25	21,3

Tabla A.18. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 15V y una velocidad tangencial de 300 L/h. Promedio (Corrida 6).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	8,990	20,5	0,866	21,1
2	7,300	21,2	2,015	21,1
5	5,145	21,3	4,740	21,3
8	2,720	21,6	7,175	21,6
10	1,469	21,7	8,245	21,8
12	0,791	21,9	8,905	21,9
15	0,321	22,2	9,315	22,1



Tabla A.19. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 10V y una velocidad tangencial de 100 L/h. Primera Experiencia (Corrida 7:1).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,07	21,2	0,889	21,2
2	7,77	20,9	1,29	21,6
5	6,62	21,3	2,56	21,6
8	5,34	21,8	4,32	21,8
10	4,03	22,1	5,66	22,1
12	2,87	22,3	6,87	22,2
15	1,406	22,4	8,15	22,2

Tabla A.20. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 10V y una velocidad tangencial de 100 L/h. Segunda Experiencia (Corrida 7:2).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,12	19,2	0,89	19,6
2	7,82	19,6	1,395	19,6
5	6,96	20,0	2,72	19,6
8	5,35	20,3	4,49	20,0
10	3,99	20,3	5,87	20,1
12	2,86	20,4	7,07	20,3
15	1,455	20,6	8,22	20,4

Tabla A.21. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 10V y una velocidad tangencial de 100 L/h. Promedio (Corrida 7).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,095	20,2	0,890	20,4
2	7,795	20,3	1,343	20,6
5	6,940	20,7	2,640	20,6
8	5,345	21,1	4,405	20,9
10	4,010	21,2	5,765	21,1
12	2,865	21,4	6,970	21,3
15	1,431	21,5	8,185	21,3



Tabla A.22. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 10V y una velocidad tangencial de 200 L/h. Primera Experiencia (Corrida 8:1).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,12	19,4	0,868	20,0
2	7,69	20,1	1,571	20,1
5	6,38	20,5	3,35	20,3
8	4,44	20,8	5,38	20,6
10	3,02	20,8	6,68	20,8
12	1,778	20,9	7,69	21,0
15	0,766	20,9	8,64	21,0

Tabla A.23. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 10V y una velocidad tangencial de 200 L/h. Segunda Experiencia (Corrida 8:2).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,16	19,6	0,875	20,7
2	7,73	21,1	1,621	21,0
5	6,15	21,4	3,57	21,3
8	4,17	21,5	5,72	21,7
10	2,76	21,8	7,06	21,8
12	1,54	22,2	8,04	21,9
15	0,627	22,2	8,91	22,1

Tabla A.24. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 10V y una velocidad tangencial de 200 L/h. Promedio (Corrida 8).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,140	19,5	0,872	20,4
2	7,710	20,6	1,596	20,6
5	6,265	21,0	3,460	20,8
8	4,305	21,2	5,550	22,1
10	2,890	21,3	6,870	21,3
12	1,659	21,6	7,865	21,5
15	0,697	21,6	8,775	21,6



Tabla A.25. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 10V y una velocidad tangencial de 300 L/h. Primera Experiencia (Corrida 9:1).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,19	20,9	0,862	21,3
2	7,64	21,4	1,634	21,3
5	6,13	21,6	3,60	21,6
8	3,93	21,9	5,89	21,8
10	2,53	22,1	7,17	22,0
12	1,365	22,1	8,21	22,3
15	0,504	22,3	8,87	22,3

Tabla A.26. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 10V y una velocidad tangencial de 300 L/h. Segunda Experiencia (Corrida 9:2).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,17	20,4	0,865	21,3
2	7,66	21,7	1,636	21,6
5	6,11	21,7	3,63	21,8
8	3,97	22,2	5,88	22,2
10	2,58	22,4	7,20	22,3
12	1,379	22,7	8,15	22,4
15	0,515	22,8	9,04	22,7

Tabla A.27. Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 10V y una velocidad tangencial de 300 L/h. Promedio (Corrida 9).

Tiempo (min)	DILUIDO		CONCENTRADO	
	Conductividad (mS/cm)	T (°C)	Conductividad (mS/cm)	T (°C)
0	9,180	20,7	0,864	21,3
2	7,650	21,6	1,635	21,5
5	6,120	21,7	3,615	21,7
8	3,950	22,1	5,885	22,0
10	2,555	22,3	7,185	22,2
12	1,372	22,	8,180	22,4
15	0,510	22,6	8,955	22,5



ANEXO II

CURVAS DE CLORUROS DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO LA VICTORIA.

Tabla A.28. Estandarización de la Solución Nitrato de Plata (AgNO_3).

	Valor
Masa de NaCl	0,1189 g
Volumen de Solución de NaCl	100 ml
Normalidad de la Solución de NaCl	0,020325 N
Volumen de Muestra de NaCl patrón	5 ml
Volumen promedio de AgNO_3 gastado	5,15 ml
Normalidad de la Solución de AgNO_3	0,019733 N

Tabla A.29. Determinación de la concentración de cloruros del Agua de Producción.

	Valor
Normalidad de la Solución de AgNO_3	0,019733 N
Volumen promedio de AgNO_3 gastado	23,6 ml
Volumen de Muestra	5 ml
Cloruros del Agua de Producción	3306,4 ppm Cl-

A continuación se muestran los resultados obtenidos de cada una de las titulaciones realizadas para la determinación de la concentración de cloruros en cada muestra tomada en función del tiempo; es importante destacar que para todos los casos el volumen de muestra tomado fue de 5ml.



Tabla A.30. Determinación de la concentración de cloruros del Agua de Producción sometida a electrodiálisis a distintas condiciones de operación. Primera Experiencia.

Corrida	Tiempo (min)	V ₁ AgNO ₃ (ml)	V ₂ AgNO ₃ (ml)	V promedio (ml)	ppm Cl ⁻	% Reducción Cl ⁻
Agua de Producción	0	23,70	23,50	23,60	3306,4	0
1.1 (30V;100L/h)	2	16,40	16,30	16,350	2290,7	30,7
	5	9,00	8,90	8,950	1253,9	62,1
	8	4,10	4,05	4,075	570,9	82,7
	10	2,20	2,25	2,225	311,7	90,6
	12	1,20	1,20	1,200	168,1	94,9
	15	0,50	0,50	0,500	70,1	97,9
2.1 (30V;200L/h)	2	13,90	14,10	14,000	1961,4	40,7
	5	4,70	4,80	4,750	665,5	79,9
	8	1,30	1,30	1,300	182,1	94,5
	10	0,55	0,55	0,550	77,1	97,7
	12	0,25	0,30	0,275	38,5	98,8
	15	0,15	0,15	0,150	21,0	99,4
3.1 (30V;300L/h)	2	14,25	14,25	14,250	1996,5	39,6
	5	4,30	4,35	4,325	605,9	81,7
	8	1,00	1,05	1,025	143,6	95,7
	10	0,40	0,35	0,375	52,5	98,4
	12	0,20	0,20	0,200	28,0	99,2
	15	0,10	0,10	0,100	14,0	99,6
4.1 (15V;100L/h)	2	20,00	20,10	20,050	2809,1	15,0
	5	14,90	15,00	14,950	2094,5	36,7
	8	9,00	9,00	9,000	1260,9	61,9
	10	5,80	5,85	5,825	816,1	75,3
	12	3,55	3,60	3,575	500,9	84,9
	15	1,70	1,75	1,725	241,7	92,7
5.1 (15V;200L/h)	2	18,30	18,50	18,400	2577,9	22,0
	5	12,00	12,10	12,050	1688,2	48,9
	8	5,50	5,60	5,550	777,6	76,5
	10	2,90	2,85	2,875	402,8	87,8
	12	1,40	1,40	1,400	196,1	94,1
	15	0,45	0,45	0,450	63,0	98,1
6.1 (15V;300L/h)	2	18,05	18,05	18,050	2528,9	23,5
	5	11,90	12,00	11,950	1674,2	49,4
	8	5,75	5,75	5,750	805,6	75,6
	10	2,95	2,95	2,950	413,3	87,5
	12	1,35	1,40	1,375	192,6	94,2
	15	0,40	0,40	0,400	56,0	98,3
7.1 (10V;100L/h)	2	19,40	19,60	19,500	2732,0	17,4
	5	16,90	16,95	16,925	2371,2	28,3
	8	12,50	12,55	12,525	1754,8	46,9
	10	9,25	9,35	9,300	1303,0	60,6
	12	6,10	6,15	6,125	858,1	74,0
	15	2,95	2,85	2,900	406,3	87,7
8.1 (10V;200L/h)	2	18,75	18,80	18,775	2630,4	20,4
	5	15,20	15,20	15,200	2129,6	35,6
	8	10,05	10,10	10,075	1411,5	57,3
	10	6,50	6,55	6,525	914,2	72,4
	12	3,75	3,70	3,725	521,9	84,2
	15	1,30	1,35	1,325	185,6	94,4
9.1 (10V;300L/h)	2	18,80	18,85	18,825	2637,4	20,2
	5	14,75	14,70	14,725	2063,0	37,6
	8	8,90	9,00	8,950	1253,9	62,1
	10	5,40	5,45	5,425	760,1	77,0
	12	2,70	2,75	2,725	381,8	88,5
	15	0,80	0,85	0,825	115,6	96,5



Tabla A.31. Determinación de la concentración de cloruros del Agua de Producción sometida a electrodiálisis a distintas condiciones de operación. Segunda Experiencia.

Corrida	Tiempo (min)	V ₁ AgNO ₃ (ml)	V ₂ AgNO ₃ (ml)	V promedio (ml)	ppm Cl-	% Reducción Cl-
Agua de Producción	0	23,70	23,50	23,60	3306,4	0
1.2 (30V;100L/h)	2	16,40	16,20	16,300	2283,7	30,9
	5	8,80	8,60	8,700	1218,9	63,1
	8	3,80	3,90	3,850	539,4	83,7
	10	2,10	2,10	2,100	294,2	91,1
	12	1,10	1,15	1,125	157,6	95,2
	15	0,45	0,45	0,450	63,0	98,1
2.2 (30V;200L/h)	2	14,60	14,60	14,600	2045,5	38,1
	5	5,35	5,40	5,375	753,1	77,2
	8	1,65	1,70	1,675	234,7	92,9
	10	0,70	0,65	0,675	94,6	97,1
	12	0,35	0,40	0,375	52,5	98,4
	15	0,20	0,15	0,175	24,5	99,3
3.2 (30V;300L/h)	2	13,85	13,80	13,825	1936,9	41,4
	5	4,20	4,30	4,250	595,4	82,0
	8	1,05	1,00	1,025	143,6	95,7
	10	0,35	0,35	0,350	49,0	98,5
	12	0,25	0,25	0,250	35,0	98,9
	15	0,10	0,10	0,100	14,0	99,6
4.2 (15V;100L/h)	2	20,00	20,00	20,000	2802,1	15,3
	5	14,90	15,00	14,950	2094,5	36,7
	8	9,00	9,10	9,050	1267,9	61,7
	10	5,95	6,00	5,975	837,1	74,7
	12	3,70	3,75	3,725	521,9	84,2
	15	1,70	1,75	1,725	241,7	92,7
5.2 (15V;200L/h)	2	18,70	18,60	18,650	2612,9	21,0
	5	12,60	12,70	12,650	1772,3	46,4
	8	6,55	6,50	6,525	914,2	72,4
	10	3,50	3,50	3,500	490,4	85,2
	12	1,80	1,80	1,800	252,2	92,4
	15	0,60	0,65	0,625	87,6	97,4
6.2 (15V;300L/h)	2	18,25	18,30	18,275	2560,4	22,6
	5	12,10	12,10	12,100	1695,2	48,7
	8	5,75	5,80	5,775	809,1	75,5
	10	2,90	2,95	2,925	409,8	87,6
	12	1,40	1,40	1,400	196,1	94,1
	15	0,45	0,45	0,450	63,0	98,1
7.2 (10V;100L/h)	2	19,50	19,45	19,475	2728,5	17,5
	5	16,85	16,95	16,900	2367,7	28,4
	8	12,45	12,55	12,500	1751,3	47,0
	10	9,20	9,20	9,200	1288,9	61,0
	12	6,05	6,10	6,075	851,1	74,3
	15	3,00	3,05	3,025	423,8	87,2
8.2 (10V;200L/h)	2	18,95	18,95	18,950	2654,9	19,7
	5	14,85	14,90	14,875	2084,0	37,0
	8	9,35	9,40	9,375	1313,5	60,3
	10	5,90	5,90	5,900	826,6	75,0
	12	3,25	3,25	3,250	455,3	86,2
	15	1,10	1,10	1,100	154,1	95,3
9.2 (10V;300L/h)	2	18,75	18,85	18,800	2633,9	20,3
	5	14,75	14,80	14,775	2070,0	37,4
	8	8,90	9,05	8,975	1257,4	62,0
	10	5,50	5,45	5,475	767,1	76,8
	12	2,80	2,85	2,825	395,8	88,0
	15	0,90	0,90	0,900	126,1	96,2



Tabla A.32. Determinación de la concentración de cloruros del Agua de Producción sometida a electrodiálisis a distintas condiciones de operación. Promedio.

Corrida	Tiempo (min)	V ₁ AgNO ₃ (ml)	V ₂ AgNO ₃ (ml)	V promedio (ml)	ppm Cl-	% Reducción Cl-
Agua de Producción	0	23,70	23,50	23,60	3306,4	0
1 (30V;100L/h)	2	16,40	16,25	16,325	2287,2	30,8
	5	8,90	8,75	8,825	1236,4	62,6
	8	3,95	3,98	3,963	555,2	83,2
	10	2,15	2,18	2,163	303,0	90,8
	12	1,15	1,18	1,163	162,9	95,1
	15	0,48	0,48	0,475	66,5	98,0
2 (30V;200L/h)	2	14,25	14,35	14,300	2003,5	39,4
	5	5,03	5,10	5,063	709,3	78,5
	8	1,48	1,50	1,488	208,4	93,7
	10	0,63	0,60	0,613	85,8	97,4
	12	0,30	0,35	0,325	45,5	98,6
	15	0,18	0,15	0,163	22,8	99,3
3 (30V;300L/h)	2	14,05	14,03	14,038	1966,7	40,5
	5	4,25	4,33	4,288	600,7	81,8
	8	1,03	1,03	1,025	143,6	95,7
	10	0,38	0,35	0,363	50,8	98,5
	12	0,23	0,23	0,225	31,5	99,0
	15	0,10	0,10	0,100	14,0	99,6
4 (15V;100L/h)	2	20,00	20,05	20,025	2805,6	15,1
	5	14,90	15,00	14,950	2094,5	36,7
	8	9,00	9,05	9,025	1264,4	61,8
	10	5,88	5,93	5,900	826,6	75,0
	12	3,63	3,68	3,650	511,4	84,5
	15	1,70	1,75	1,725	241,7	92,7
5 (15V;200L/h)	2	18,50	18,55	18,525	2595,4	21,5
	5	12,30	12,40	12,350	1730,3	47,7
	8	6,03	6,05	6,038	845,9	74,4
	10	3,20	3,18	3,188	446,6	86,5
	12	1,60	1,60	1,600	224,2	93,2
	15	0,53	0,55	0,538	75,3	97,7
6 (15V;300L/h)	2	18,15	18,18	18,163	2544,6	23,0
	5	12,00	12,05	12,025	1684,7	49,0
	8	5,75	5,78	5,763	807,3	75,6
	10	2,93	2,95	2,938	411,6	87,6
	12	1,38	1,40	1,388	194,4	94,1
	15	0,43	0,43	0,425	59,5	98,2
7 (10V;100L/h)	2	19,45	19,53	19,488	2730,3	17,4
	5	16,88	16,95	16,913	2369,5	28,3
	8	12,48	12,55	12,513	1753,0	47,0
	10	9,23	9,28	9,250	1296,0	60,8
	12	6,08	6,13	6,100	854,6	74,2
	15	2,98	2,95	2,963	415,1	87,4
8 (10V;200L/h)	2	18,85	18,88	18,863	2642,7	20,1
	5	15,03	15,05	15,038	2106,8	36,3
	8	9,70	9,75	9,725	1362,5	58,8
	10	6,20	6,23	6,213	870,4	73,7
	12	3,50	3,48	3,488	488,6	85,2
	15	1,20	1,23	1,213	169,9	94,9
9 (10V;300L/h)	2	18,78	18,85	18,813	2635,7	20,3
	5	14,75	14,75	14,750	2066,5	37,5
	8	8,90	9,03	8,963	1255,7	62,0
	10	5,45	5,45	5,450	763,6	76,9
	12	2,75	2,80	2,775	388,8	88,2
	15	0,85	0,88	0,863	120,8	96,3



Tabla A.33. Constantes de la ecuación de ajuste de las curvas de cloruros del agua de producción del campo La Victoria a distintas condiciones de operación.

Muestra	Constantes de ecuación de ajuste. ppm Cl ⁻ = A+B.t+C.t ² +D.t ³				Tiempo para 1000ppm	Tiempo para 500ppm
	A	B	C	D		
Diluido 1 (30V; 100L/h)	3302,44	-565,62	33,13	-0,65	5,839 min	8,425 min
Diluido 2 (30V; 200L/h)	3317,35	-792,98	64,22	-1,73	4,175 min	5,989 min
Diluido 3 (30V; 300L/h)	3326,50	-838,74	70,54	-1,96	3,932 min	5,589 min
Diluido 4 (15V; 100L/h)	3296,22	-210,81	-11,44	0,80	9,253 min	12,011 min
Diluido 5 (15V; 200L/h)	3296,48	-335,94	-0,28	0,56	7,490 min	9,825 min
Diluido 6 (15V; 300L/h)	3290,06	-356,23	2,39	0,47	7,299 min	9,635 min
Diluido 7 (10V; 100L/h)	3239,87	-177,59	-3,04	0,15	11,626 min	14,401 min
Diluido 8 (10V; 200L/h)	3248,01	-230,72	-4,59	0,41	9,468 min	12,166 min
Diluido 9 (10V; 300L/h)	3249,65	-230,33	-7,57	0,60	9,004 min	11,574 min

www.bdigital.ula.ve

**ANEXO III****CURVAS DE DUREZA DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO LA VICTORIA.****Tabla A.34.** Estandarización de la Solución de EDTA.

	Valor
Título de Solución Patrón de CaCO ₃	1,00 mg/ml
Volumen de Muestra de CaCO ₃ patrón	5 Ml
Volumen promedio de EDTA gastado	5,25 Ml
Título de la Solución de EDTA	0,952381 mg/ml

Tabla A.35. Determinación de la dureza del Agua de Producción.

	Valor
Título de la Solución de EDTA	0,952381 mg/ml
Volumen promedio de EDTA gastado	5,65 Ml
Volumen de Muestra	5 Ml
Dureza del Agua de Producción	1076,2 ppm CaCO ₃

A continuación se muestran los resultados obtenidos de cada una de las titulaciones realizadas para la determinación de la dureza de cada muestra tomada en función del tiempo; es importante destacar que para todos los casos el volumen de muestra tomado fue de 5ml.

**Tabla A.36.** Determinación de la dureza del Agua de Producción sometida a electrodiálisis a distintas condiciones de operación. Primera Experiencia.

Corrida	Tiempo (min)	V ₁ EDTA (ml)	V ₂ EDTA (ml)	V promedio (ml)	ppm CaCO ₃	% Reducción CaCO ₃
Agua de Producción	0	5,65	5,65	5,65	1076,2	0
1.1 (30V;100L/h)	2	3,4	3,45	3,425	652,4	39,4
	5	2,05	2,05	2,050	390,5	63,7
	8	1,25	1,15	1,200	228,6	78,8
	10	0,7	0,75	0,725	138,1	87,2
	12	0,45	0,50	0,475	90,5	91,6
	15	0,25	0,30	0,275	52,4	95,1
2.1 (30V;200L/h)	2	3,10	3,10	3,100	590,5	45,1
	5	1,30	1,25	1,275	242,9	77,4
	8	0,55	0,50	0,525	100,0	90,7
	10	0,30	0,25	0,275	52,4	95,1
	12	0,20	0,25	0,225	42,9	96,0
	15	0,05	0,05	0,050	9,5	99,1
3.1 (30V;300L/h)	2	2,75	2,65	2,700	514,3	52,2
	5	1,20	1,25	1,225	233,3	78,3
	8	0,50	0,50	0,500	95,2	91,2
	10	0,20	0,20	0,200	38,1	96,5
	12	0,05	0,05	0,050	9,5	99,1
	15	0,00	0,00	0,000	0,0	100,0
4.1 (15V;100L/h)	2	3,10	3,20	3,150	600,0	44,2
	5	2,40	2,40	2,400	457,1	57,5
	8	1,85	1,80	1,825	347,6	67,7
	10	1,60	1,60	1,600	304,8	71,7
	12	1,20	1,20	1,200	228,6	78,8
	15	0,75	0,80	0,775	147,6	86,3
5.1 (15V;200L/h)	2	2,80	2,90	2,850	542,9	49,6
	5	2,00	2,00	2,000	381,0	64,6
	8	1,30	1,20	1,250	238,1	77,9
	10	0,95	0,95	0,950	181,0	83,2
	12	0,60	0,60	0,600	114,3	89,4
	15	0,35	0,30	0,325	61,9	94,2
6.1 (15V;300L/h)	2	2,85	2,80	2,825	538,1	50,0
	5	1,45	1,45	1,450	276,2	74,3
	8	1,15	1,10	1,125	214,3	80,1
	10	0,60	0,65	0,625	119,0	88,9
	12	0,45	0,50	0,475	90,5	91,6
	15	0,30	0,30	0,300	57,1	94,7
7.1 (10V;100L/h)	2	3,90	3,95	3,925	747,6	30,5
	5	3,15	3,20	3,175	604,8	43,8
	8	2,10	2,10	2,100	400,0	62,8
	10	1,80	1,70	1,750	333,3	69,0
	12	1,50	1,50	1,500	285,7	73,5
	15	0,90	0,95	0,925	176,2	83,6
8.1 (10V;200L/h)	2	3,20	3,25	3,225	614,3	42,9
	5	2,50	2,55	2,525	481,0	55,3
	8	1,75	1,75	1,750	333,3	69,0
	10	1,20	1,25	1,225	233,3	78,3
	12	0,65	0,65	0,650	123,8	88,5
	15	0,35	0,35	0,350	66,7	93,8
9.1 (10V;300L/h)	2	2,80	2,80	2,800	533,3	50,4
	5	2,15	2,15	2,150	409,5	61,9
	8	1,20	1,20	1,200	228,6	78,8
	10	0,80	0,75	0,775	147,6	86,3
	12	0,45	0,45	0,450	85,7	92,0
	15	0,25	0,25	0,250	47,6	95,6



Tabla A.37. Determinación de la dureza del Agua de Producción sometida a electrodiálisis a distintas condiciones de operación. Segunda Experiencia.

Corrida	Tiempo (min)	V ₁ EDTA (ml)	V ₂ EDTA (ml)	V promedio (ml)	ppm CaCO ₃	% Reducción CaCO ₃
Agua de Producción	0	5,65	5,65	5,65	1076,2	0
1.2 (30V;100L/h)	2	3,35	3,40	3,375	642,9	40,3
	5	1,90	1,90	1,900	361,9	66,4
	8	1,10	1,15	1,125	214,3	80,1
	10	0,70	0,70	0,700	133,3	87,6
	12	0,45	0,40	0,425	81,0	92,5
	15	0,25	0,25	0,250	47,6	95,6
2.2 (30V;200L/h)	2	3,25	3,25	3,250	619,0	42,5
	5	1,55	1,55	1,550	295,2	72,6
	8	0,75	0,70	0,725	138,1	87,2
	10	0,30	0,35	0,325	61,9	94,2
	12	0,25	0,30	0,275	52,4	95,1
	15	0,15	0,15	0,150	28,6	97,3
3.2 (30V;300L/h)	2	2,70	2,60	2,650	504,8	53,1
	5	1,15	1,20	1,175	223,8	79,2
	8	0,45	0,45	0,450	85,7	92,0
	10	0,25	0,25	0,250	47,6	95,6
	12	0,10	0,10	0,100	19,0	98,2
	15	0,00	0,00	0,000	0,0	100,0
4.2 (15V;100L/h)	2	3,10	3,20	3,150	600,0	44,2
	5	2,30	2,40	2,350	447,6	58,4
	8	1,85	1,75	1,800	342,9	68,1
	10	1,50	1,45	1,475	281,0	73,9
	12	1,00	1,05	1,025	195,2	81,9
	15	0,65	0,70	0,675	128,6	88,1
5.2 (15V;200L/h)	2	2,80	2,80	2,800	533,3	50,4
	5	1,90	1,90	1,900	361,9	66,4
	8	1,30	1,25	1,275	242,9	77,4
	10	1,00	1,00	1,000	190,5	82,3
	12	0,60	0,60	0,600	114,3	89,4
	15	0,35	0,35	0,350	66,7	93,8
6.2 (15V;300L/h)	2	2,80	2,75	2,775	528,6	50,9
	5	1,75	1,70	1,725	328,6	69,5
	8	1,00	1,05	1,025	195,2	81,9
	10	0,70	0,75	0,725	138,1	87,2
	12	0,50	0,50	0,500	95,2	91,2
	15	0,25	0,30	0,275	52,4	95,1
7.2 (10V;100L/h)	2	3,90	3,90	3,900	742,9	31,0
	5	2,95	2,90	2,925	557,1	48,2
	8	2,20	2,10	2,150	409,5	61,9
	10	1,60	1,70	1,650	314,3	70,8
	12	1,35	1,30	1,325	252,4	76,5
	15	0,65	0,75	0,700	133,3	87,6
8.2 (10V;200L/h)	2	3,05	3,00	3,025	576,2	46,5
	5	2,20	2,15	2,175	414,3	61,5
	8	1,40	1,30	1,350	257,1	76,1
	10	1,05	1,00	1,025	195,2	81,9
	12	0,65	0,65	0,650	123,8	88,5
	15	0,25	0,30	0,275	52,4	95,1
9.2 (10V;300L/h)	2	2,70	2,75	2,725	519,0	51,8
	5	2,15	2,10	2,125	404,8	62,4
	8	1,15	1,15	1,150	219,0	79,6
	10	0,85	0,80	0,825	157,1	85,4
	12	0,40	0,45	0,425	81,0	92,5
	15	0,20	0,25	0,225	42,9	96,0



Tabla A.38. Determinación de la dureza del Agua de Producción sometida a electrodiálisis a distintas condiciones de operación. Promedio.

Corrida	Tiempo (min)	V ₁ EDTA (ml)	V ₂ EDTA (ml)	V promedio (ml)	ppm CaCO ₃	% Reducción CaCO ₃
Agua de Producción	0	5,65	5,65	5,65	1076,2	0
1 (30V;100L/h)	2	3,38	3,43	3,400	647,6	39,8
	5	1,98	1,98	1,975	376,2	65,0
	8	1,18	1,15	1,163	221,4	79,4
	10	0,70	0,73	0,713	135,7	87,4
	12	0,45	0,45	0,450	85,7	92,0
	15	0,25	0,28	0,263	50,0	95,4
2 (30V;200L/h)	2	3,18	3,18	3,175	604,8	43,8
	5	1,43	1,40	1,413	269,0	75,0
	8	0,65	0,60	0,625	119,0	88,9
	10	0,30	0,30	0,300	57,1	94,7
	12	0,23	0,28	0,250	47,6	95,6
	15	0,10	0,10	0,100	19,0	98,2
3 (30V;300L/h)	2	2,73	2,63	2,675	509,5	52,7
	5	1,18	1,23	1,200	228,6	78,8
	8	0,48	0,48	0,475	90,5	91,6
	10	0,23	0,23	0,225	42,9	96,0
	12	0,08	0,08	0,075	14,3	98,7
	15	0,00	0,00	0,000	0,0	100,0
4 (15V;100L/h)	2	3,10	3,20	3,150	600,0	44,2
	5	2,35	2,40	2,375	452,4	58,0
	8	1,85	1,78	1,813	345,2	67,9
	10	1,55	1,53	1,538	292,9	72,8
	12	1,10	1,13	1,113	211,9	80,3
	15	0,70	0,75	0,725	138,1	87,2
5 (15V;200L/h)	2	2,80	2,85	2,825	538,1	50,0
	5	1,95	1,95	1,950	371,4	65,5
	8	1,30	1,23	1,263	240,5	77,7
	10	0,98	0,98	0,975	185,7	82,7
	12	0,60	0,60	0,600	114,3	89,4
	15	0,35	0,33	0,338	64,3	94,0
6 (15V;300L/h)	2	2,83	2,78	2,800	533,3	50,4
	5	1,60	1,58	1,588	302,4	71,9
	8	1,08	1,08	1,075	204,8	81,0
	10	0,65	0,70	0,675	128,6	88,1
	12	0,48	0,50	0,488	92,9	91,4
	15	0,28	0,30	0,288	54,8	94,9
7 (10V;100L/h)	2	3,90	3,93	3,913	745,2	30,8
	5	3,05	3,05	3,050	581,0	46,0
	8	2,15	2,10	2,125	404,8	62,4
	10	1,70	1,70	1,700	323,8	69,9
	12	1,43	1,40	1,413	269,0	75,0
	15	0,78	0,85	0,813	154,8	85,6
8 (10V;200L/h)	2	3,13	3,13	3,125	595,2	44,7
	5	2,35	2,35	2,350	447,6	58,4
	8	1,58	1,53	1,550	295,2	72,6
	10	1,13	1,13	1,125	214,3	80,1
	12	0,65	0,65	0,650	123,8	88,5
	15	0,30	0,33	0,313	59,5	94,5
9 (10V;300L/h)	2	2,75	2,78	2,763	526,2	51,1
	5	2,15	2,13	2,138	407,1	62,2
	8	1,18	1,18	1,175	223,8	79,2
	10	0,83	0,78	0,800	152,4	85,8
	12	0,43	0,45	0,438	83,3	92,3
	15	0,23	0,25	0,238	45,2	95,8



ANEXO IV

CURVAS DE CALCIO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO LA VICTORIA.

Tabla A.39. Estandarización de la Solución de EDTA.

	Valor
Título de Solución Patrón de CaCO_3	1,00 mg/ml
Volumen de Muestra de CaCO_3 patrón	5 Ml
Volumen promedio de EDTA gastado	5,25 Ml
Título de la Solución de EDTA	0,952381 mg/ml

Tabla A.40. Determinación del calcio presente en el Agua de Producción.

	Valor
Título de la Solución de EDTA	0,952381 mg/ml
Volumen promedio de EDTA gastado	4,2 Ml
Volumen de Muestra	5 Ml
Carbonato de Calcio del Agua de Producción	800,0 ppm CaCO_3
Calcio del Agua de Producción	320,0 ppm Ca^{2+}

A continuación se muestran los resultados obtenidos de cada una de las titulaciones realizadas para la determinación de la concentración de calcio de cada muestra tomada en función del tiempo; es importante destacar que para todos los casos el volumen de muestra tomado fue de 5ml.



Tabla A.41. Determinación de la concentración de calcio del Agua de Producción sometida a electrodiálisis a distintas condiciones de operación. Primera Experiencia.

Corrida	Tiempo (min)	V ₁ EDTA (ml)	V ₂ EDTA (ml)	V promedio (ml)	ppm CaCO ₃	ppm Ca ²⁺	% Reducción Ca ²⁺
Agua de Producción	0	4,20	4,20	4,20	800,0	320,0	0
1.1 (30V;100L/h)	2	2,25	2,20	2,225	423,8	169,5	47,0
	5	1,05	1,05	1,050	200,0	80,0	75,0
	8	0,65	0,65	0,650	123,8	49,5	84,5
	10	0,45	0,45	0,450	85,7	34,3	89,3
	12	0,25	0,30	0,275	52,4	21,0	93,5
	15	0,10	0,10	0,100	19,0	7,6	97,6
2.1 (30V;200L/h)	2	2,10	2,05	2,075	395,2	158,1	50,6
	5	0,80	0,85	0,825	157,1	62,9	80,4
	8	0,25	0,25	0,250	47,6	19,0	94,0
	10	0,20	0,20	0,200	38,1	15,2	95,2
	12	0,15	0,15	0,150	28,6	11,4	96,4
	15	0,05	0,05	0,050	9,5	3,8	98,8
3.1 (30V;300L/h)	2	2,00	2,00	2,000	381,0	152,4	52,4
	5	0,75	0,75	0,750	142,9	57,1	82,1
	8	0,25	0,25	0,250	47,6	19,0	94,0
	10	0,15	0,10	0,125	23,8	9,5	97,0
	12	0,05	0,05	0,050	9,5	3,8	98,8
	15	0,00	0,00	0,000	0,0	0,0	100,0
4.1 (15V;100L/h)	2	2,25	2,25	2,250	428,6	171,4	46,4
	5	1,60	1,65	1,625	309,5	123,8	61,3
	8	1,25	1,20	1,225	233,3	93,3	70,8
	10	1,00	1,00	1,000	190,5	76,2	76,2
	12	0,65	0,70	0,675	128,6	51,4	83,9
	15	0,40	0,45	0,425	81,0	32,4	89,9
5.1 (15V;200L/h)	2	2,00	1,95	1,975	376,2	150,5	53,0
	5	1,15	1,15	1,150	219,0	87,6	72,6
	8	0,70	0,70	0,700	133,3	53,3	83,3
	10	0,40	0,40	0,400	76,2	30,5	90,5
	12	0,25	0,25	0,250	47,6	19,0	94,0
	15	0,10	0,10	0,100	19,0	7,6	97,6
6.1 (15V;300L/h)	2	1,80	1,80	1,800	342,9	137,1	57,1
	5	0,90	0,90	0,900	171,4	68,6	78,6
	8	0,60	0,60	0,600	114,3	45,7	85,7
	10	0,35	0,30	0,325	61,9	24,8	92,3
	12	0,20	0,15	0,175	33,3	13,3	95,8
	15	0,10	0,10	0,100	19,0	7,6	97,6
7.1 (10V;100L/h)	2	2,90	2,85	2,875	547,6	219,0	31,5
	5	2,00	2,05	2,025	385,7	154,3	51,8
	8	1,45	1,40	1,425	271,4	108,6	66,1
	10	1,25	1,30	1,275	242,9	97,1	69,6
	12	1,00	1,10	1,050	200,0	80,0	75,0
	15	0,60	0,55	0,575	109,5	43,8	86,3
8.1 (10V;200L/h)	2	2,45	2,50	2,475	471,4	188,6	41,1
	5	1,90	1,90	1,900	361,9	144,8	54,8
	8	1,15	1,20	1,175	223,8	89,5	72,0
	10	0,70	0,75	0,725	138,1	55,2	82,7
	12	0,40	0,40	0,400	76,2	30,5	90,5
	15	0,20	0,25	0,225	42,9	17,1	94,6
9.1 (10V;300L/h)	2	2,20	2,15	2,175	414,3	165,7	48,2
	5	1,50	1,55	1,525	290,5	116,2	63,7
	8	0,80	0,90	0,848	161,4	64,6	79,8
	10	0,50	0,50	0,500	95,2	38,1	88,1
	12	0,35	0,30	0,325	61,9	24,8	92,3
	15	0,15	0,15	0,150	28,6	11,4	96,4



Tabla A.42. Determinación de la concentración de calcio del Agua de Producción sometida a electrodiálisis a distintas condiciones de operación. Segunda Experiencia.

Corrida	Tiempo (min)	V ₁ EDTA (ml)	V ₂ EDTA (ml)	V promedio (ml)	ppmCaCO ₃	ppm Ca ²⁺	% Reducción Ca ²⁺
Agua de Producción	0	4,20	4,20	4,20	800,0	320,0	0
1.2 (30V;100L/h)	2	2,15	2,25	2,200	419,0	167,6	47,6
	5	1,25	1,25	1,250	238,1	95,2	70,2
	8	0,75	0,70	0,725	138,1	55,2	82,7
	10	0,45	0,45	0,450	85,7	34,3	89,3
	12	0,25	0,30	0,275	52,4	21,0	93,5
	15	0,10	0,10	0,100	19,0	7,6	97,6
2.2 (30V;200L/h)	2	2,20	2,15	2,175	414,3	165,7	48,2
	5	0,90	0,90	0,900	171,4	68,6	78,6
	8	0,35	0,35	0,350	66,7	26,7	91,7
	10	0,20	0,20	0,200	38,1	15,2	95,2
	12	0,15	0,15	0,150	28,6	11,4	96,4
	15	0,05	0,05	0,050	9,5	3,8	98,8
3.2 (30V;300L/h)	2	2,00	2,00	2,000	381,0	152,4	52,4
	5	0,80	0,75	0,775	147,6	59,0	81,5
	8	0,30	0,25	0,275	52,4	21,0	93,5
	10	0,10	0,10	0,100	19,0	7,6	97,6
	12	0,05	0,05	0,050	9,5	3,8	98,8
	15	0,00	0,00	0,000	0,0	0,0	100,0
4.2 (15V;100L/h)	2	2,30	2,30	2,300	438,1	175,2	45,2
	5	1,80	1,80	1,800	342,9	137,1	57,1
	8	1,25	1,25	1,250	238,1	95,2	70,2
	10	0,95	0,95	0,950	181,0	72,4	77,4
	12	0,60	0,65	0,625	119,0	47,6	85,1
	15	0,40	0,40	0,400	76,2	30,5	90,5
5.2 (15V;200L/h)	2	2,00	2,00	2,000	381,0	152,4	52,4
	5	1,20	1,25	1,225	233,3	93,3	70,8
	8	0,65	0,70	0,675	128,6	51,4	83,9
	10	0,50	0,45	0,475	90,5	36,2	88,7
	12	0,30	0,25	0,275	52,4	21,0	93,5
	15	0,10	0,10	0,100	19,0	7,6	97,6
6.2 (15V;300L/h)	2	1,90	1,90	1,900	361,9	144,8	54,8
	5	1,25	1,25	1,250	238,1	95,2	70,2
	8	0,60	0,60	0,600	114,3	45,7	85,7
	10	0,40	0,35	0,375	71,4	28,6	91,1
	12	0,25	0,20	0,225	42,9	17,1	94,6
	15	0,10	0,10	0,100	19,0	7,6	97,6
7.2 (10V;100L/h)	2	2,85	2,85	2,850	542,9	217,1	32,1
	5	2,25	2,25	2,250	428,6	171,4	46,4
	8	1,50	1,55	1,525	290,5	116,2	63,7
	10	1,15	1,20	1,175	223,8	89,5	72,0
	12	0,85	0,85	0,850	161,9	64,8	79,8
	15	0,50	0,50	0,500	95,2	38,1	88,1
8.2 (10V;200L/h)	2	2,30	2,30	2,300	438,1	175,2	45,2
	5	1,70	1,70	1,700	323,8	129,5	59,5
	8	0,90	0,90	0,900	171,4	68,6	78,6
	10	0,65	0,70	0,675	128,6	51,4	83,9
	12	0,35	0,40	0,375	71,4	28,6	91,1
	15	0,20	0,20	0,200	38,1	15,2	95,2
9.2 (10V;300L/h)	2	2,10	2,10	2,100	400,0	160,0	50,0
	5	1,55	1,50	1,525	290,5	116,2	63,7
	8	0,75	0,75	0,750	142,9	57,1	82,1
	10	0,45	0,45	0,450	85,7	34,3	89,3
	12	0,20	0,25	0,225	42,9	17,1	94,6
	15	0,10	0,10	0,100	19,0	7,6	97,6



Tabla A.43. Determinación de la concentración de calcio del Agua de Producción sometida a electrodiálisis a distintas condiciones de operación. Promedio.

Corrida	Tiempo (min)	V ₁ EDTA (ml)	V ₂ EDTA (ml)	V promedio (ml)	ppmCaCO ₃	ppm Ca ²⁺	% Reducción Ca ²⁺
Agua de Producción	0	4,20	4,20	4,20	800,0	320,0	0
1 (30V;100L/h)	2	2,200	2,225	2,213	421,4	168,6	47,3
	5	1,150	1,150	1,150	219,0	87,6	72,6
	8	0,700	0,675	0,688	131,0	52,4	83,6
	10	0,450	0,450	0,450	85,7	34,3	89,3
	12	0,250	0,300	0,275	52,4	21,0	93,5
	15	0,100	0,100	0,100	19,0	7,6	97,6
2 (30V;200L/h)	2	2,125	2,150	2,125	404,8	161,9	49,4
	5	1,025	1,050	0,863	164,3	65,7	79,5
	8	0,500	0,475	0,300	57,1	22,9	92,9
	10	0,325	0,325	0,200	38,1	15,2	95,2
	12	0,200	0,225	0,150	28,6	11,4	96,4
	15	0,075	0,075	0,050	9,5	3,8	98,8
3 (30V;300L/h)	2	2,150	2,100	2,000	381,0	152,4	52,4
	5	0,850	0,875	0,763	145,2	58,1	81,8
	8	0,300	0,300	0,263	50,0	20,0	93,8
	10	0,200	0,200	0,113	21,4	8,6	97,3
	12	0,150	0,150	0,050	9,5	3,8	98,8
	15	0,050	0,050	0,000	0,0	0,0	100,0
4 (15V;100L/h)	2	2,100	2,075	2,275	433,3	173,3	45,8
	5	0,825	0,825	1,713	326,2	130,5	59,2
	8	0,300	0,300	1,238	235,7	94,3	70,5
	10	0,175	0,150	0,975	185,7	74,3	76,8
	12	0,100	0,100	0,650	123,8	49,5	84,5
	15	0,025	0,025	0,413	78,6	31,4	90,2
5 (15V;200L/h)	2	2,000	2,000	1,988	378,6	151,4	52,7
	5	0,775	0,750	1,188	226,2	90,5	71,7
	8	0,275	0,250	0,688	131,0	52,4	83,6
	10	0,125	0,100	0,438	83,3	33,3	89,6
	12	0,050	0,050	0,263	50,0	20,0	93,8
	15	0,000	0,000	0,100	19,0	7,6	97,6
6 (15V;300L/h)	2	2,125	2,125	1,850	352,4	141,0	56,0
	5	1,200	1,200	1,075	204,8	81,9	74,4
	8	0,775	0,725	0,600	114,3	45,7	85,7
	10	0,550	0,550	0,350	66,7	26,7	91,7
	12	0,350	0,375	0,200	38,1	15,2	95,2
	15	0,200	0,225	0,100	19,0	7,6	97,6
7 (10V;100L/h)	2	2,275	2,275	2,863	545,2	218,1	31,8
	5	1,700	1,725	2,138	407,1	162,9	49,1
	8	1,250	1,225	1,475	281,0	112,4	64,9
	10	0,975	0,975	1,225	233,3	93,3	70,8
	12	0,625	0,675	0,950	181,0	72,4	77,4
	15	0,400	0,425	0,538	102,4	41,0	87,2
8 (10V;200L/h)	2	2,150	2,125	2,388	454,8	181,9	43,2
	5	1,475	1,475	1,800	342,9	137,1	57,1
	8	0,975	0,975	1,038	197,6	79,0	75,3
	10	0,675	0,675	0,700	133,3	53,3	83,3
	12	0,425	0,450	0,388	73,8	29,5	90,8
	15	0,250	0,250	0,213	40,5	16,2	94,9
9 (10V;300L/h)	2	2,000	1,975	2,138	407,1	162,9	49,1
	5	1,175	1,200	1,525	290,5	116,2	63,7
	8	0,675	0,700	0,799	152,1	60,9	81,0
	10	0,450	0,425	0,475	90,5	36,2	88,7
	12	0,275	0,250	0,275	52,4	21,0	93,5
	15	0,100	0,100	0,125	23,8	9,5	97,0



ANEXO V

CURVAS DE MAGNESIO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO LA VICTORIA.

Tabla A.44. Estandarización de la Solución de EDTA.

	Valor
Título de Solución Patrón de CaCO_3	1,00 mg/ml
Volumen de Muestra de CaCO_3 patrón	5 ml
Volumen promedio de EDTA gastado	5,25 ml
Título de la Solución de EDTA	0,952381 mg/ml

Tabla A.45. Determinación del Magnesio presente en el Agua de Producción.

	Valor
Título de la Solución de EDTA	0,952381 mg/ml
Dureza del Agua de Producción	1076,2 ppm CaCO_3
Carbonato de Calcio del Agua de Producción	800,0 ppm CaCO_3
Carbonato de Magnesio del Agua de Producción	276,2 ppm CaCO_3 eq
Magnesio del Agua de Producción	66,3 ppm Mg^{2+}

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la determinación de la concentración de magnesio de cada muestra tomada en función del tiempo; cuya determinación es indirecta ya que depende de la dureza total y de la determinación de los iones calcio (es la diferencia, dureza menos calcio).



Tabla A.46. Determinación de la concentración de magnesio del Agua de Producción sometida a electrodiálisis a distintas condiciones de operación. Primera Experiencia.

Corrida	Tiempo (min)	Dureza	ppm CaCO ₃	ppm CaCO ₃ eq	ppm Mg ⁺⁺	% Reducción Mg ⁺⁺
Agua de Producción	0	1076,2	800,0	276,2	66,3	0
1.1 (30V;100L/h)	2	652,4	423,8	228,6	54,9	17,2
	5	390,5	200,0	190,5	45,7	31,0
	8	228,6	123,8	104,8	25,1	62,1
	10	138,1	85,7	52,4	12,6	81,0
	12	90,5	52,4	38,1	9,1	86,2
	15	52,4	19,0	33,3	8,0	87,9
2.1 (30V;200L/h)	2	590,5	395,2	195,2	46,9	29,3
	5	242,9	157,1	85,7	20,6	69,0
	8	100,0	47,6	52,4	12,6	81,0
	10	52,4	38,1	14,3	3,4	94,8
	12	42,9	28,6	14,3	3,4	94,8
	15	9,5	9,5	0,0	0,0	100,0
3.1 (30V;300L/h)	2	514,3	381,0	133,3	32,0	51,7
	5	233,3	142,9	90,5	21,7	67,2
	8	95,2	47,6	47,6	11,4	82,8
	10	38,1	23,8	14,3	3,4	94,8
	12	9,5	9,5	0,0	0,0	100,0
	15	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
4.1 (15V;100L/h)	2	600,0	428,6	171,4	41,1	37,9
	5	457,1	309,5	147,6	35,4	46,6
	8	347,6	233,3	114,3	27,4	58,6
	10	304,8	190,5	114,3	27,4	58,6
	12	228,6	128,6	100,0	24,0	63,8
	15	147,6	81,0	66,7	16,0	75,9
5.1 (15V;200L/h)	2	542,9	376,2	166,7	40,0	39,7
	5	381,0	219,0	161,9	38,9	41,4
	8	238,1	133,3	104,8	25,1	62,1
	10	181,0	76,2	104,8	25,1	62,1
	12	114,3	47,6	66,7	16,0	75,9
	15	61,9	19,0	42,9	10,3	84,5
6.1 (15V;300L/h)	2	538,1	342,9	195,2	46,9	29,3
	5	276,2	171,4	104,8	25,1	62,1
	8	214,3	114,3	100,0	24,0	63,8
	10	119,0	61,9	57,1	13,7	79,3
	12	90,5	33,3	57,1	13,7	79,3
	15	57,1	19,0	38,1	9,1	86,2
7.1 (10V;100L/h)	2	747,6	547,6	200,0	48,0	27,6
	5	604,8	385,7	219,0	52,6	20,7
	8	400,0	271,4	128,6	30,9	53,4
	10	333,3	242,9	90,5	21,7	67,2
	12	285,7	200,0	85,7	20,6	69,0
	15	176,2	109,5	66,7	16,0	75,9
8.1 (10V;200L/h)	2	614,3	471,4	142,9	34,3	48,3
	5	481,0	361,9	119,0	28,6	56,9
	8	333,3	223,8	109,5	26,3	60,3
	10	233,3	138,1	95,2	22,9	65,5
	12	123,8	76,2	47,6	11,4	82,8
	15	66,7	42,9	23,8	5,7	91,4
9.1 (10V;300L/h)	2	533,3	414,3	119,0	28,6	56,9
	5	409,5	290,5	119,0	28,6	56,9
	8	228,6	161,4	67,1	16,1	75,7
	10	147,6	95,2	52,4	12,6	81,0
	12	85,7	61,9	23,8	5,7	91,4
	15	47,6	28,6	19,0	4,6	93,1



Tabla A.47. Determinación de la concentración de magnesio del Agua de Producción sometida a electrodiálisis a distintas condiciones de operación. Segunda Experiencia.

Corrida	Tiempo (min)	Dureza	ppm CaCO3	ppm CaCO3 eq	ppm Mg++	% Reducción Mg++
Agua de Producción	0	1076,2	800,0	276,2	66,3	0
1.2 (30V;100L/h)	2	642,9	419,0	223,8	53,7	19,0
	5	361,9	238,1	123,8	29,7	55,2
	8	214,3	138,1	76,2	18,3	72,4
	10	133,3	85,7	47,6	11,4	82,8
	12	81,0	52,4	28,6	6,9	89,7
	15	47,6	19,0	28,6	6,9	89,7
2.2 (30V;200L/h)	2	619,0	414,3	204,8	49,1	25,9
	5	295,2	171,4	123,8	29,7	55,2
	8	138,1	66,7	71,4	17,1	74,1
	10	61,9	38,1	23,8	5,7	91,4
	12	52,4	28,6	23,8	5,7	91,4
	15	28,6	9,5	19,0	4,6	93,1
3.2 (30V;300L/h)	2	504,8	381,0	123,8	29,7	55,2
	5	223,8	147,6	76,2	18,3	72,4
	8	85,7	52,4	33,3	8,0	87,9
	10	47,6	19,0	28,6	6,9	89,7
	12	19,0	9,5	9,5	2,3	96,6
	15	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
4.2 (15V;100L/h)	2	600,0	438,1	161,9	38,9	41,4
	5	447,6	342,9	104,8	25,1	62,1
	8	342,9	238,1	104,8	25,1	62,1
	10	281,0	181,0	100,0	24,0	63,8
	12	195,2	119,0	76,2	18,3	72,4
	15	128,6	76,2	52,4	12,6	81,0
5.2 (15V;200L/h)	2	533,3	381,0	152,4	36,6	44,8
	5	361,9	233,3	128,6	30,9	53,4
	8	242,9	128,6	114,3	27,4	58,6
	10	190,5	90,5	100,0	24,0	63,8
	12	114,3	52,4	61,9	14,9	77,6
	15	66,7	19,0	47,6	11,4	82,8
6.2 (15V;300L/h)	2	528,6	361,9	166,7	40,0	39,7
	5	328,6	238,1	90,5	21,7	67,2
	8	195,2	114,3	81,0	19,4	70,7
	10	138,1	71,4	66,7	16,0	75,9
	12	95,2	42,9	52,4	12,6	81,0
	15	52,4	19,0	33,3	8,0	87,9
7.2 (10V;100L/h)	2	742,9	542,9	200,0	48,0	27,6
	5	557,1	428,6	128,6	30,9	53,4
	8	409,5	290,5	119,0	28,6	56,9
	10	314,3	223,8	90,5	21,7	67,2
	12	252,4	161,9	90,5	21,7	67,2
	15	133,3	95,2	38,1	9,1	86,2
8.2 (10V;200L/h)	2	576,2	438,1	138,1	33,1	50,0
	5	414,3	323,8	90,5	21,7	67,2
	8	257,1	171,4	85,7	20,6	69,0
	10	195,2	128,6	66,7	16,0	75,9
	12	123,8	71,4	52,4	12,6	81,0
	15	52,4	38,1	14,3	3,4	94,8
9.2 (10V;300L/h)	2	519,0	400,0	119,0	28,6	56,9
	5	404,8	290,5	114,3	27,4	58,6
	8	219,0	142,9	76,2	18,3	72,4
	10	157,1	85,7	71,4	17,1	74,1
	12	81,0	42,9	38,1	9,1	86,2
	15	42,9	19,0	23,8	5,7	91,4



Tabla A.48. Determinación de la concentración de magnesio del Agua de Producción sometida a electrodiálisis a distintas condiciones de operación. Promedio.

Corrida	Tiempo (min)	Dureza	ppm CaCO ₃	ppm CaCO ₃ eq	ppm Mg ⁺⁺	% Reducción Mg ⁺⁺
Agua de Producción	0	1076,2	800,0	276,2	66,3	0
1 (30V;100L/h)	2	647,6	421,4	226,2	54,3	18,1
	5	376,2	219,0	157,1	37,7	43,1
	8	221,4	131,0	90,5	21,7	67,2
	10	135,7	85,7	50,0	12,0	81,9
	12	85,7	52,4	33,3	8,0	87,9
	15	50,0	19,0	31,0	7,4	88,8
2 (30V;200L/h)	2	604,8	404,8	200,0	48,0	27,6
	5	269,0	164,3	104,8	25,1	62,1
	8	119,0	57,1	61,9	14,9	77,6
	10	57,1	38,1	19,0	4,6	93,1
	12	47,6	28,6	19,0	4,6	93,1
	15	19,0	9,5	9,5	2,3	96,6
3 (30V;300L/h)	2	509,5	381,0	128,6	30,9	53,4
	5	228,6	145,2	83,3	20,0	69,8
	8	90,5	50,0	40,5	9,7	85,3
	10	42,9	21,4	21,4	5,1	92,2
	12	14,3	9,5	4,8	1,1	98,3
	15	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
4 (15V;100L/h)	2	600,0	433,3	166,7	40,0	39,7
	5	452,4	326,2	126,2	30,3	54,3
	8	345,2	235,7	109,5	26,3	60,3
	10	292,9	185,7	107,1	25,7	61,2
	12	211,9	123,8	88,1	21,1	68,1
	15	138,1	78,6	59,5	14,3	78,4
5 (15V;200L/h)	2	538,1	378,6	159,5	38,3	42,2
	5	371,4	226,2	145,2	34,9	47,4
	8	240,5	131,0	109,5	26,3	60,3
	10	185,7	83,3	102,4	24,6	62,9
	12	114,3	50,0	64,3	15,4	76,7
	15	64,3	19,0	45,2	10,9	83,6
6 (15V;300L/h)	2	533,3	352,4	181,0	43,4	34,5
	5	302,4	204,8	97,6	23,4	64,7
	8	204,8	114,3	90,5	21,7	67,2
	10	128,6	66,7	61,9	14,9	77,6
	12	92,9	38,1	54,8	13,1	80,2
	15	54,8	19,0	35,7	8,6	87,1
7 (10V;100L/h)	2	745,2	545,2	200,0	48,0	27,6
	5	581,0	407,1	173,8	41,7	37,1
	8	404,8	281,0	123,8	29,7	55,2
	10	323,8	233,3	90,5	21,7	67,2
	12	269,0	181,0	88,1	21,1	68,1
	15	154,8	102,4	52,4	12,6	81,0
8 (10V;200L/h)	2	595,2	454,8	140,5	33,7	49,1
	5	447,6	342,9	104,8	25,1	62,1
	8	295,2	197,6	97,6	23,4	64,7
	10	214,3	133,3	81,0	19,4	70,7
	12	123,8	73,8	50,0	12,0	81,9
	15	59,5	40,5	19,0	4,6	93,1
9 (10V;300L/h)	2	526,2	407,1	119,0	28,6	56,9
	5	407,1	290,5	116,7	28,0	57,8
	8	223,8	152,1	71,7	17,2	74,1
	10	152,4	90,5	61,9	14,9	77,6
	12	83,3	52,4	31,0	7,4	88,8
	15	45,2	23,8	21,4	5,1	92,2



ANEXO VI

CONSUMO ENERGÉTICO DE LAS CORRIDAS DE DESALACIÓN DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO LA VICTORIA.

Tabla A.49. Variación de la Intensidad de Corriente en la Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 30V y una velocidad tangencial de 100 L/h.

a) Primera Experiencia (Corrida 1:1)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	2,86	3,84	4,25	3,95	3,45	2,9	2,33	1,84	1,44	1,13	0,88	0,68	0,53	0,41	0,32	0,26

b) Segunda Experiencia (Corrida 1:2)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	2,95	4,05	4,33	4	3,46	2,86	2,27	1,79	1,4	1,08	0,84	0,64	0,5	0,38	0,3	0,24

c) Promedio (Corrida 1)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	2,91	3,95	4,29	3,98	3,46	2,88	2,30	1,82	1,42	1,11	0,86	0,66	0,52	0,40	0,31	0,25

Tabla A.50. Variación de la Intensidad de Corriente en la Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 30V y una velocidad tangencial de 200 L/h.

a) Primera Experiencia (Corrida 2:1)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	3,95	5,61	5,92	4,91	3,61	2,54	1,74	1,18	0,8	0,55	0,38	0,27	0,2	0,15	0,12	0,1

b) Segunda Experiencia (Corrida 2:2)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	3,47	5,24	5,83	5,07	3,88	2,81	1,96	1,37	0,95	0,65	0,46	0,33	0,24	0,18	0,14	0,11

c) Promedio (Corrida 2)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	3,71	5,43	5,88	4,99	3,75	2,68	1,85	1,28	0,88	0,60	0,42	0,30	0,22	0,17	0,13	0,11



Tabla A.51. Variación de la Intensidad de Corriente en la Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 30V y una velocidad tangencial de 300 L/h.

a) Primera Experiencia (Corrida 3:1)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	3,53	5,4	6,27	5,51	4,02	2,73	1,77	1,14	0,75	0,49	0,33	0,22	0,16	0,12	0,11	0,1

b) Segunda Experiencia (Corrida 3:2)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	3,56	5,45	6,25	5,5	4,02	2,73	1,76	1,14	0,74	0,48	0,32	0,22	0,16	0,12	0,11	0,1

c) Promedio (Corrida 3)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	3,55	5,43	6,26	5,51	4,02	2,73	1,77	1,14	0,75	0,49	0,33	0,22	0,16	0,12	0,11	0,10

Tabla A.52. Variación de la Intensidad de Corriente en la Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 15V y una velocidad tangencial de 100 L/h.

a) Primera Experiencia (Corrida 4:1)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	1,27	1,52	1,87	2,21	2,47	2,6	2,59	2,4	2,1	1,78	1,49	1,22	0,98	0,79	0,63	0,5

b) Segunda Experiencia (Corrida 4:2)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	1,29	1,54	1,9	2,25	2,51	2,66	2,65	2,44	2,14	1,8	1,54	1,27	1,04	0,82	0,66	0,52

c) Promedio (Corrida 4)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	1,28	1,53	1,89	2,23	2,49	2,63	2,62	2,42	2,12	1,79	1,52	1,25	1,01	0,81	0,65	0,51

Tabla A.53. Variación de la Intensidad de Corriente en la Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 15V y una velocidad tangencial de 200 L/h.

a) Primera Experiencia (Corrida 5:1)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	1,47	1,92	2,49	3,02	3,28	3,25	2,98	2,55	2,08	1,62	1,22	0,89	0,65	0,46	0,33	0,24

**b) Segunda Experiencia (Corrida 5:2)**

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	1,37	1,78	2,28	2,74	3,01	3,06	2,88	2,57	2,17	1,76	1,38	1,04	0,77	0,56	0,4	0,29

c) Promedio (Corrida 5)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	1,42	1,85	2,39	2,88	3,15	3,16	2,93	2,56	2,13	1,69	1,30	0,97	0,71	0,51	0,37	0,27

Tabla A.54. Variación de la Intensidad de Corriente en la Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 15V y una velocidad tangencial de 300 L/h.

a) Primera Experiencia (Corrida 6:1)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	1,53	2,03	2,56	2,94	3,11	3,09	2,89	2,54	2,15	1,71	1,32	0,97	0,7	0,48	0,34	0,24

b) Segunda Experiencia (Corrida 6:2)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	1,44	1,91	2,48	2,93	3,17	3,2	3,01	2,65	2,21	1,74	1,32	0,96	0,69	0,48	0,34	0,24

c) Promedio (Corrida 6)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	1,49	1,97	2,52	2,94	3,14	3,15	2,95	2,60	2,18	1,73	1,32	0,97	0,70	0,48	0,34	0,24

Tabla A.55. Variación de la Intensidad de Corriente en la Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 10V y una velocidad tangencial de 100 L/h.

a) Primera Experiencia (Corrida 7:1)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	0,76	0,86	1,03	1,23	1,42	1,63	1,85	2,04	2,15	2,14	2,02	1,83	1,59	1,33	1,09	0,87

b) Segunda Experiencia (Corrida 7:2)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	0,79	0,9	1,07	1,25	1,44	1,63	1,85	2,03	2,13	2,08	1,93	1,72	1,48	1,23	1,01	0,82

c) Promedio (Corrida 7)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	0,78	0,88	1,05	1,24	1,43	1,63	1,85	2,04	2,14	2,11	1,98	1,78	1,54	1,28	1,05	0,85



Tabla A.56. Variación de la Intensidad de Corriente en la Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 10V y una velocidad tangencial de 200 L/h.

a) Primera Experiencia (Corrida 8:1)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	1,02	1,24	1,52	1,79	2,01	2,18	2,28	2,31	2,25	2,12	1,92	1,65	1,38	1,05	0,78	0,57

b) Segunda Experiencia (Corrida 8:2)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	1,07	1,33	1,65	1,94	2,17	2,33	2,4	2,39	2,29	2,1	1,84	1,53	1,21	0,91	0,66	0,47

c) Promedio (Corrida 8)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	1,05	1,29	1,59	1,87	2,09	2,26	2,34	2,35	2,27	2,11	1,88	1,59	1,3	0,98	0,72	0,52

Tabla A.57. Variación de la Intensidad de Corriente en la Desalación del Agua de Producción aplicando una diferencia de potencial de 10V y una velocidad tangencial de 300 L/h.

a) Primera Experiencia (Corrida 9:1)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	1,11	1,38	1,7	2	2,25	2,42	2,51	2,49	2,38	2,17	1,88	1,54	1,19	0,87	0,6	0,41

b) Segunda Experiencia (Corrida 9:2)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	1,13	1,39	1,73	2,01	2,25	2,41	2,5	2,48	2,37	2,17	1,89	1,55	1,23	0,88	0,61	0,42

c) Promedio (Corrida 9)

Tiempo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Amperaje	1,12	1,39	1,72	2,01	2,25	2,42	2,51	2,49	2,38	2,17	1,89	1,55	1,21	0,88	0,61	0,42

Tabla A.58. Consumo Energético debido a las Bombas.

	Valor
Diferencia de Potencial	113 V
Intensidad de Corriente	0,3 A
Potencia de la Bomba	33,8 W
Tiempo de Operación	60 Min
Volumen de Agua de Producción Tratada	2 L
Energía de Bombeo	16,9 W.h/L

**Tabla A.59.** Consumo Energético debido al Proceso de Separación.

Corrida	Área bajo la curva (Amp.min)	Diferencia de Potencial (V)	Volumen de Agua Tratada (L)	Energía de Separación (W.h/L)
1:1	31,8	30	2	7,96
1:2	37,4	30	2	9,35
1	34,5	30	2	8,64
2:1	32,6	30	2	8,16
2:2	29,1	30	2	7,28
2	21,5	30	2	5,37
3:1	26,1	30	2	6,53
3:2	27,2	30	2	6,81
3	26,7	30	2	6,67
4:1	20,4	15	2	2,55
4:2	28,6	15	2	3,58
4	25,3	15	2	3,16
5:1	33,5	15	2	4,18
5:2	30,6	15	2	3,83
5	31,2	15	2	3,90
6:1	28,4	15	2	3,55
6:2	36,5	15	2	4,57
6	31,7	15	2	3,96
7:1	15,2	10	2	1,26
7:2	13,6	10	2	1,13
7	13,7	10	2	1,14
8:1	25,2	10	2	2,10
8:2	19,0	10	2	1,58
8	26,2	10	2	2,18
9:1	18,5	10	2	1,54
9:2	26,1	10	2	2,17
9	17,3	10	2	1,44



Tabla A.60. Constantes de la ecuación de ajuste del consumo energético debido a la separación en la desalinización del agua de producción del campo La Victoria a distintas condiciones de operación.

Muestra	Constantes de ecuación de ajuste. Energía = A+B.t+C.t ² +D.t ³ +E.t ⁴ +F.t ⁵						Energía consumida hasta 1000ppm Cl ⁻ (W.h/L)		
	A	B	C	D	E	F	Bombeo	Separación	Total
Corrida 1 (30V; 100L/h)	2,90232	1,60862	-0,60794	0,07593	-0,00420	0,00009	5,877	5,246	11,123
Corrida 2 (30V; 200L/h)	3,71122	2,90999	-1,28134	0,18121	-0,01099	0,00024	5,407	5,240	10,648
Corrida 3 (30V; 300L/h)	3,46322	3,54726	-1,49532	0,20781	-0,01241	0,00027	5,339	5,247	10,586
Corrida 4 (15V; 100L/h)	1,28180	0,11491	0,15994	-0,03834	0,00284	-0,00007	6,839	2,495	9,334
Corrida 5 (15V; 200L/h)	1,39158	0,41561	0,12277	-0,04277	0,00354	-0,00009	6,342	2,458	8,800
Corrida 6 (15V; 300L/h)	1,46619	0,50022	0,06964	-0,03273	0,00278	-0,00007	6,269	2,426	8,694
Corrida 7 (10V; 100L/h)	0,78037	0,07561	0,02412	0,00166	-0,00061	0,00002	7,509	1,393	8,902
Corrida 8 (10V; 200L/h)	1,04024	0,22764	0,03763	-0,00876	0,00039	-0,000003	6,900	1,556	8,456
Corrida 9 (10V; 300L/h)	1,11801	0,24007	0,04635	-0,01083	0,00051	-0,00001	6,769	1,536	8,305

www.bdigital.ula.ve