

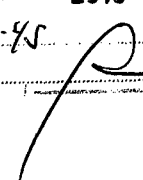
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA**



1170
May
05/08/2015
14:00h.
257

R	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
E	VICE-RECTORÍA
C	188
H	13 AGO 2015
B	HORA: 14:45
I	
D	
O	FIRMA: 

INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN

**“EVALUACION EXPERIMENTAL DE ESPACIADORES DE
FLUJO EN LA TRANSFERENCIA DE MASA EN UN MODULO DE
ELECTRODIALISIS REVERSIBLE”**

AUTOR:

ING. JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA

PERIODO DE EJECUCIÓN: DEL 01 DE SETIEMBRE DEL 2013

AL 31 AGOSTO 2015

RESOLUCIÓN N° 865-2013-R

CALLAO – PERU

2015

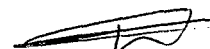


I.	INDICE	Pagina
1.1.	Índice de Tablas	04
1.2.	Índice de Figuras y Gráficos	05
II.	RESUMEN Y ABSTRACT	07
2.1.	Resumen	07
2.2.	Abstract	08
III.	INTRODUCCION	09
3.1.	Problema de Investigación	09
3.2.	Importancia y Justificación	10
IV.	MARCO TEORICO	11
4.1.	Proceso de Electrodiálisis	11
4.2.	Componentes del Proceso de Electrodiálisis	12
4.2.1.	Membrana de Intercambio Iónico	12
4.2.2.	Espaciadores	13
4.2.3.	Electrodos	14
4.3.	Principio de Operación de la Celda de Electrodiálisis	15
4.4.	Clasificación de los Procesos de Electrodiálisis	16
4.4.1.	Proceso Batch	16
4.4.2.	Proceso Continuo	17
4.5.	Polarización por Concentración	18
4.6.	Corriente Limite	18
4.7.	Determinación de la Corriente Limite	19
4.8.	Derivación de la Ecuación de la Densidad de la Corriente Limite	20
4.9.	Diámetro Hidráulico	21
4.10.	Números Adimensionales para el cálculo del Coeficiente de Transferencia de Masa	22
4.10.1.	Numero de Reynolds	22
4.10.2.	Numero de Schmidt	23
4.10.3.	Numero de Sherwood	24



4.11.	Calculo de Coeficiente de Transferencia de Masa	24
4.12.	Transporte de Masa mediante la Ecuación Nernst –Planck	25
4.13.	Método de Análisis de Datos	26
4.13.1.	Relación entre Concentración y Conductividad	26
4.13.2.	Grado de Desalinización	27
V.	MATERIALES Y MÉTODOS	28
5.1	Materiales	28
5.1.1.	Membranas	28
5.1.2.	Electrodos	29
5.1.3.	Bombas centrifugas	29
5.1.4.	Fuente Eléctrica	30
5.1.5.	Espaciadores	30
5.1.6.	Reactivos Químicos	31
5.1.7.	Configuración de las Membranas	31
5.1.8.	Ensamblaje del Equipo Experimental	32
5.1.9.	Equipo Experimental	32
5.2.	Población y Muestra	35
5.3.	Diseño Experimental	35
5.4.	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	36
5.4.1.	Técnicas	36
5.4.2.	Recolección de Datos	37
5.5.	Método de análisis de Datos	37
5.6.	Metodología	38
5.6.1.	Determinación de la Corriente Limite	38
5.6.2.	Porcentaje de Separación	39
VI.	RESULTADOS	40
6.1.	Determinación de la Corriente Limite	40
6.2.	Porcentaje de Separación en los Compartimientos	43

6.3.	Determinación del Coeficiente de Transferencia de Masa	64
VII.	DISCUSION DE RESULTADOS	68
7.1	Determinación de la Corriente Limite	68
7.2.	Porcentaje de Separación en los Compartimientos	68
7.3.	Coeficiente de Transferencia de Masa	69
VIII.	REFERENCIALES	70
IX.	APENDICES	72
X.	ANEXOS	77
10.1.	Matriz de Consistencia	78
10.2.	Tablas y Figuras	79



I. INDICE


1.1. Índice de Tablas

1.1.1. Tabla N° 5.1 Propiedades de las Membranas de Intercambio Iónico	28
1.1.2. Tabla N° 5.2 Parámetros y Niveles de Operación	35
1.1.3. Tabla N° 5.3 Diseño del Plan de Experimentación mediante Metodología Taguchi	36
1.1.4. Tabla N° 5.4 Parámetros de Operación de la determinación de la Corriente Limite	38
1.1.5. Tabla N° 6.1 Intensidad de Corriente- Voltaje	40
1.1.6. Tabla N° 6.2 Intensidad de Corriente- Voltaje	41
1.1.7. Tabla N° 6.3 Intensidad de Corriente- Voltaje	42
1.1.8. Tabla N° 6.4 Conductividad – Tiempo	43
1.1.9. Tabla N° 6.5 Conductividad – Tiempo	44
1.1.10. Tabla N° 6.6 Conductividad – Tiempo	45
1.1.11. Tabla N° 6.7 Conductividad – Tiempo	47
1.1.12. Tabla N° 6.8 Conductividad – Tiempo	48
1.1.13. Tabla N° 6,9 Conductividad – Tiempo	49
1.1.14. Tabla N° 6.10 Conductividad – Tiempo	51
1.1.15. Tabla N° 6.11 Conductividad – Tiempo	53
1.1.16. Tabla N° 6.12 Conductividad – Tiempo	55
1.1.17. Tabla N° 6.13 Porcentaje de Separación	57
1.1.18. Tabla N° 6.14 Parámetros en el cálculo de Coeficiente de Transferencia de Masa	64
1.1.19. Tabla N° 6.15 Parámetros en el Cálculo de Coeficiente de Transferencia de Masa	65
1.1.20. Tabla N° 6.16 Números A dimensionales en el Cálculo de Coeficiente de Transferencia de Masa	66
1.1.21. Tabla N° 6.17 Coeficiente de transferencia de Masa	67

1.2. Índice de Figuras y Gráficos

1.2.1. Figura N° 4.1 Esquema General de un Sistema de Electrodiálisis	11
1.2.2. Figura N° 4.2 Membrana de Intercambio iónico	13
1.2.3. Figura N° 4.3 Esquema de tipos de Espaciadores	14
1.2.4. Figura N° 4.4 Esquema de un Electrodo	15
1.2.5. Figura N° 4.5 Transporte de Iones a través de una Membrana	16
1.2.6. Figura N° 4.6 Diagrama de Proceso por Batch	17
1.2.7. Figura N° 4.7 Diagrama de Proceso Continuo	17
1.2.8. Figura N° 5.1 Membrana de Intercambio	28
1.2.9. Figura N° 5.2 Ando de Titanio	29
1.2.10. Figura N° 5.3 Bombas	29
1.2.11. Figura N° 5.4 Fuente Eléctrica	30
1.2.12. Figura N° 5,5, Espaciadores de Flujo	30
1.2.13. Figura N° 5,6 Configuración de las Membranas	31
1.2.14. Figura N°5,7 Ensamblaje del Equipo Experimental	32
1.2.15. Figura 5.8 Equipo Experimental	34
1.2.16. Figura N° 5.9 Conductímetro	37
1.2.17. Gráfico N° 4.1. Curva para determinar la Corriente Limite	20
1.2.18. Gráfico N° 6.1 Intensidad de Corriente Vs Voltaje	40
1.2.19. Gráfico N° 6.2 intensidad de Corriente Vs Voltaje	41
1.2.20. Gráfico N° 6.3 Intensidad de Corriente Vs Voltaje	42
1.2.21. Gráfico N° 6.4 Conductividad del Concentrado y Diluido en función del Tiempo	43
1.2.22. Grafica N° 6.5 Conductividad del Concentrado y Diluido en función del Tiempo	44
1.2.23. Grafica N° 6.6 Conductividad del Concentrado y Diluido en función del Tiempo	46

1.2.24. Grafica N° 6.7 Conductividad del Concentrado y Diluido en función del Tiempo	47
1.2.25. Grafica N° 6.8 Conductividad del Concentrado y Diluido en función del Tiempo	48
1.2.26. Grafica N° 6.9 Conductividad del Concentrado y Diluido en función del Tiempo	50
1.2.27. Grafica N° 6.10 Conductividad del Concentrado y Diluido en función del Tiempo	52
1.2.28. Grafica N° 6.11 Conductividad del Concentrado y Diluido en función del Tiempo	54
1.2.29. Grafica N° 6.12 Conductividad del Concentrado y Diluido en función del Tiempo	56
1.2.30. Grafica N° 6.13 Porcentaje de Separación Vs X1 Grafica N° 6.14 Porcentaje de Separación Vs X2	59
1.2.31. Grafica N° 6.15 Porcentaje de Separación Vs X3 Grafica N° 6.16 Porcentaje de Separación Vs X4	60
1.2.32. Grafica N° 6.17 Coeficiente de Transferencia de Masa en función de la Velocidad lineal	67



II. RESUMEN Y ABSTRACT

2.1. Resumen

La electrodiálisis reversible es un proceso que emplea una combinación de membranas de intercambio catiónico y aniónica, mediante un campo eléctrico sobre soluciones electrolíticas se obtiene soluciones diluidas y concentradas. Los espaciadores son elementos que permiten aumentar la turbulencia, obteniéndose un mayor transporte iónico dentro del módulo de electrodiálisis.

En el presente trabajo se ha construido tres tipos de espaciadores de diferentes geometrías y estudiado su efecto frente al transporte de masa de los iones. Se estudió la influencia de los parámetros de operación, voltaje, flujo, concentración de alimentación de cloruro de sodio con respecto al transporte de masa. Se ha observado que el espaciador tipo C es el más adecuado, obteniéndose el mayor coeficiente de transferencia de masa en el equipo de electrodiálisis.



2.2. Abstract

The reversible electrodialysis is a process that uses a combination of exchange membrane cationic and anionic, through an electric field is obtained concentrated electrolyte solutions and diluted solutions.

The spacers are elements that allow increase the turbulence, resulting in ion transport module an increase within the electrodialysis In this work he has built three types of spacers of different geometries and studied their effect against the mass of the ion transport.

The influence of the operating parameters, voltage, flow, feed concentration of sodium chloride relative to mass transport was studied. It has been observed that the spacer type C is most appropriate to obtain the higher coefficient of mass transfer in the electrodialysis equipment.



III. INTRODUCCION

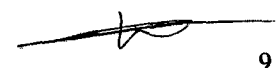
3.1. Problema de Investigación

La electrodiálisis es un proceso de separación electroquímico, que consiste en el paso de iones a través de membranas de intercambio iónico, por el efecto de la corriente eléctrica. La celda de electrodiálisis está constituida por una serie de membranas tanto aniónicas como catiónicas, unas a continuación de otras separadas por espaciadores y con electrodos en cada extremo. Cuando el potencial eléctrico es aplicado a través de los electrodos, sucede lo siguiente:

- Los cationes son atraídos por el cátodo, o electrodo negativo.
- Los aniones se sienten atraídos por el ánodo o electrodo positivo.
- Los pares de moléculas de agua se descomponen en el cátodo para producir dos grupos hidroxilo más iones de gas hidrógeno.
- Los pares de moléculas de agua se disocian en el ánodo para producir cuatro iones de hidrógeno, una molécula de oxígeno, y cuatro electrones.

La electrodiálisis reversible es un proceso en el cual la polaridad de los electrodos se invierte con el objetivo de inducir una auto limpieza química, evitando incrustaciones y polarizaciones.

Los espaciadores de flujo, son de material de plástico que tiene diferentes geometrías y se colocan para separar las membranas y promover la turbulencia y aumentar el transporte de masa de los iones en el proceso.



Este trabajo experimental tiene el objetivo de elaborar y estudiar el comportamiento de los espaciadores en el transporte de masa frente a los parámetros de operación del módulo de electrodiálisis.

De acuerdo a la situación problemática planteada anteriormente se pueden identificar el siguiente problema de investigación:

¿Cuál será el espaciador de flujo más adecuado en la transferencia de masa de un módulo de electrodiálisis reversible?

3.2. Importancia y Justificación

Los resultados de la investigación se pueden aplicar al diseño y construcción de módulos a nivel de planta piloto en beneficio de muchas regiones costeras del país, que cuentan con agua con alto contenido de sal.

La selección adecuada del tipo de espaciador permitirá obtener alta tasa de separación de iones, como consecuencia un mayor rendimiento y menor consumo de energía y justificando los bajos costos frente a los sistemas de osmosis inversa.



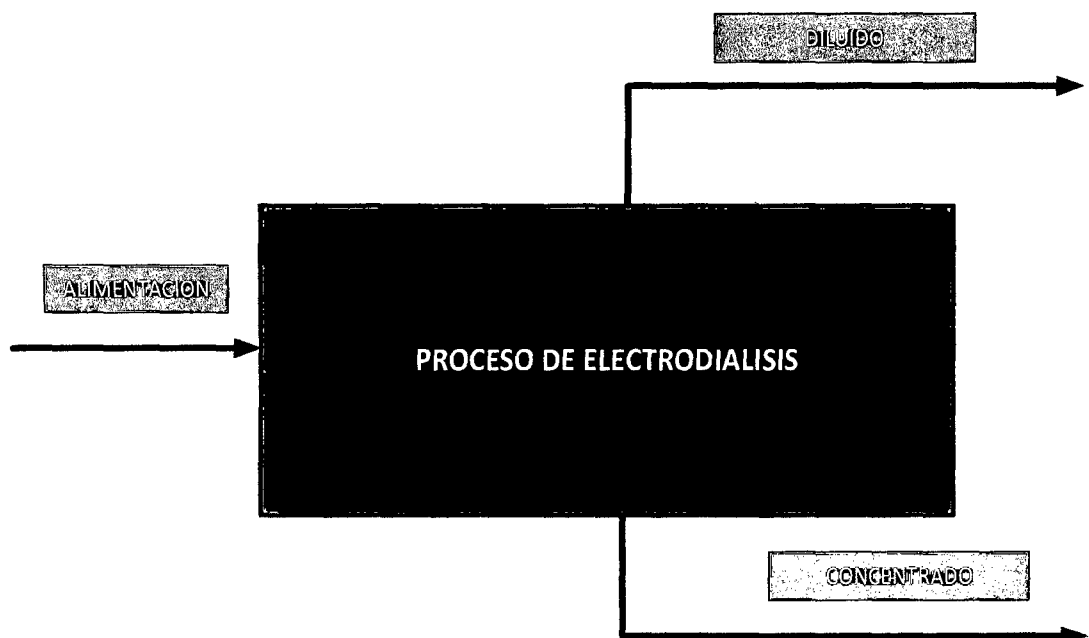
IV. MARCO TEORICO

4.1 Proceso de Electrodiálisis

La Electrodiálisis (ED) es un proceso de separación electroquímica en el que los iones son transferidos a través de membranas selectivas de intercambio iónico por medio de un potencial eléctrico de corriente continua.

El resultado global es el incremento de concentración en compartimentos alternados y la disminución de la concentración iónica en los compartimentos restantes, dando lugar a disoluciones concentradas y diluidas respectivamente como se muestra en el esquema general de la figura N° 1

FIGURA N° 4.1
ESQUEMA GENERAL DE UN SISTEMA DE ELECTRODIALISIS



Fuente: Elaboración Propia-2015

4.2. Componentes de una Celda de Electrodialisis

4.2.1. Membrana de Intercambio Iónico:

En los procesos de ED se utilizan dos tipos de membranas, las membranas aniónicas y la catiónicas. Consisten de una estructura porosa que tiene la apariencia física de una lámina de plástico que contiene grupos funcionales fijos cargados, neutralizadas con cargas opuestas móviles que pueden desplazarse tanto en la membrana como en la solución y reciben el nombre contra iones.

a) Membrana de Intercambio Catiónica:

Las membranas de intercambio catiónico sólo son permeables a los cationes, mientras que constituyen una barrera eléctrica para los aniones.

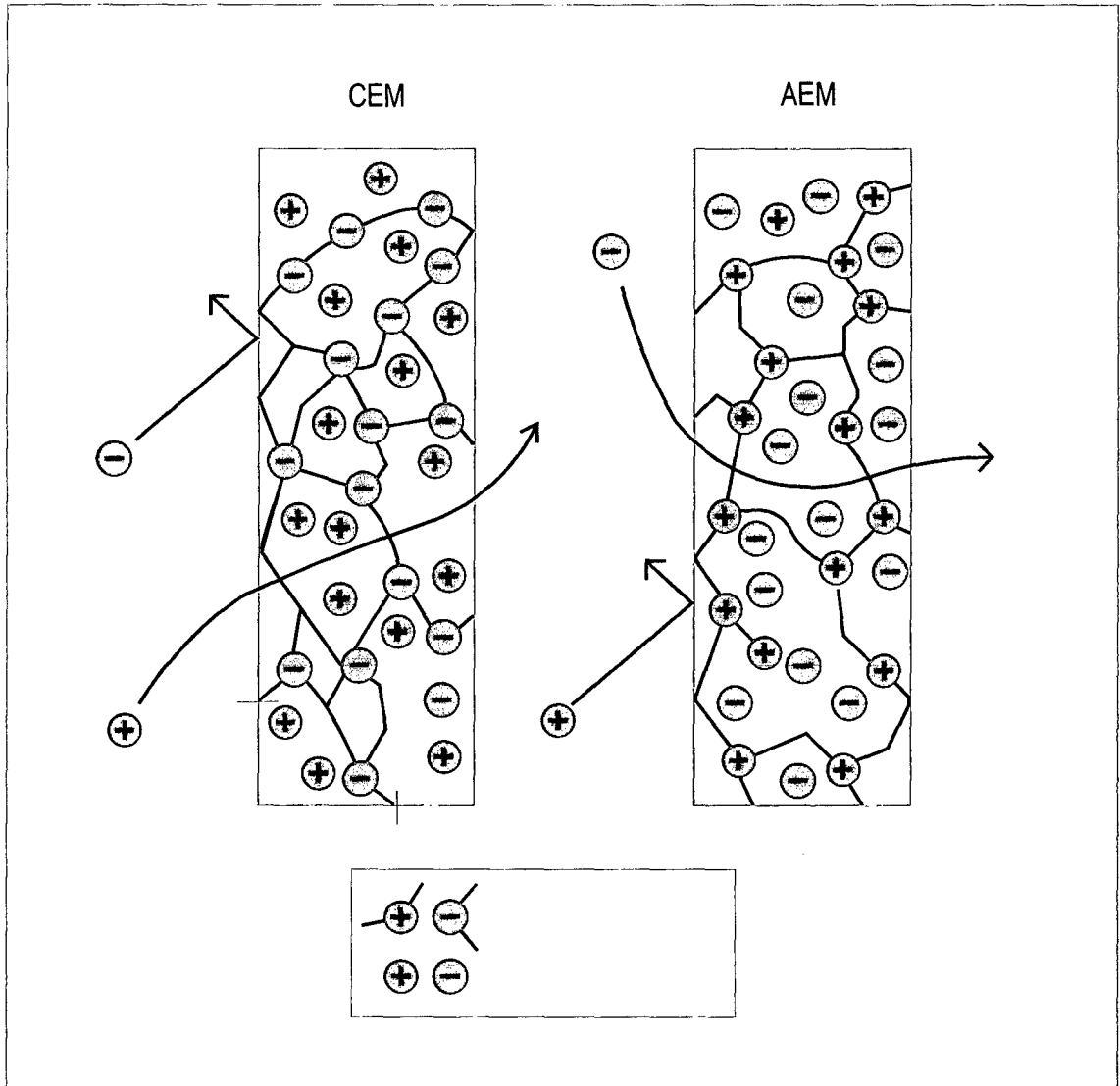
b) Membrana de Intercambio Aniónica:

Una membrana aniónica permitirá sólo el paso de aniones en este caso los grupos fijos son de carga .Ciertas propiedades son típicas de ambas membranas, aniónica y catiónica:

- Baja resistencia eléctrica,
- Insolubles en disolución acuosa,
- Semi-rígida para facilitar su manejo durante el montaje,
- Resistencia al cambio de pH de 1 a 10,
- Operación a temperaturas de hasta 46 °C,
- Resistencia a la presión osmótica cuando trabaja con disoluciones salinas de 2000 y 30000 ppm
- Expectativas de larga vida, entre 6 y 7 años en función de las condiciones de operación.
- Impermeables al agua bajo presión.



FIGURA N° 4.2
MEMBRANA DE INTERCAMBIO CATIONICO Y ANIONICA



Fuente: Elaboración Propia-2011

4.2.2. Espaciadores

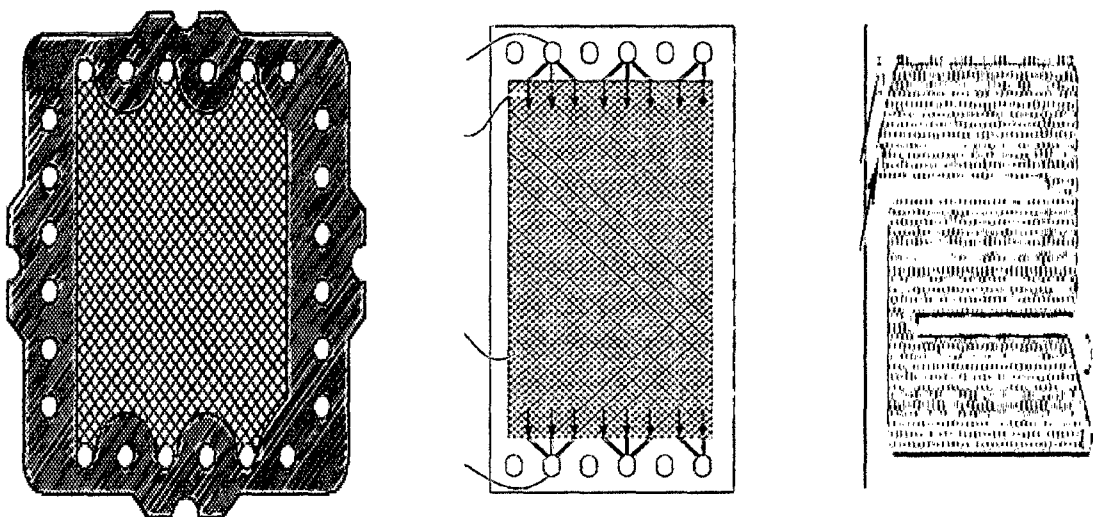
Son estructuras malladas, fabricadas de un material plástico que proporcionan canales de flujo a través de los cuales fluyen las disoluciones. Las funciones de un espaciador son varias:

- Separar las membranas evitando que se toquen y cortocircuiten.



- Originar un camino para que el fluido pueda circular.
- Generar la separación entre fluidos.
- Provocar la alternancia de flujos a lo largo de la pila.
- sellan las celdas, a la vez que soportan las membranas
- Provocar la mayor turbulencia posible, aumentando el transporte iónico

FIGURA N° 4.3
ESQUEMA DE TIPOS DE ESPACIADORES



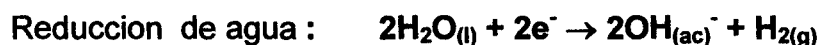
Fuente: Elaboración Propia-2011

4.2.3. Electrodo

Los electrodos metálicos, localizados en los extremos del stack, son usados para conducir la corriente eléctrica.

Suelen ser láminas de titanio recubiertas de platino. La función de los electrodos es proporcionar el campo eléctrico necesario para que se lleve a cabo el proceso.

- **Cátodo:** Se utiliza generalmente acero inoxidable 316, Las reacciones en el cátodo son relativamente moderadas con el desprendimiento de gas hidrogeno.



La disociación del agua incrementa sustancialmente el pH debido a los iones OH^- .

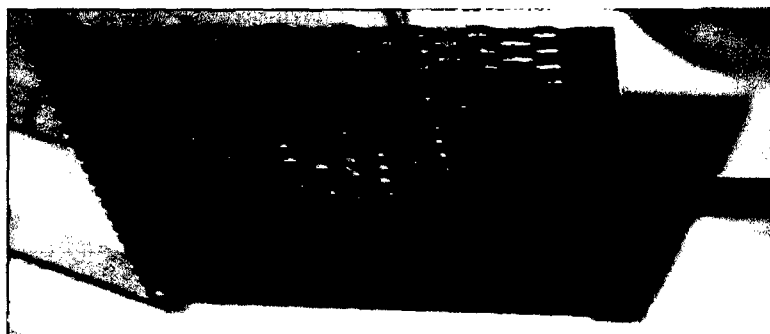
- **Ánodo:** Los materiales de estos electrodos deben soportar las condiciones agresivas de sustancias oxidantes



Si están presente iones cloruro: $2 \text{Cl}^- \rightarrow 2\text{e}^- + \text{Cl}_2 (g)$
entre los materiales que se pueden utilizar tenemos Ir/Ti, Pt/Ti.

FIGURA N° 4.4

ESQUEMA DE UN ELECTRODO



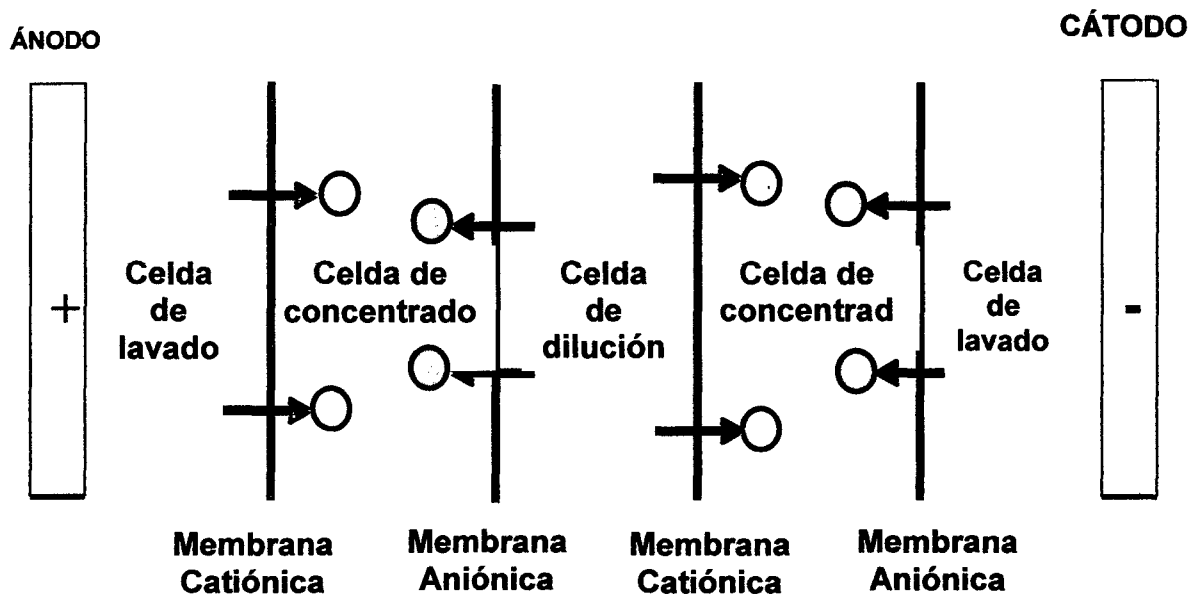
Fuente: Elaboración Propia-2015

4.3. Principio de Operación de la Celda de Electrodialisis

La celda de electrodiálisis es una repetición de membranas cationicas y aniónicas. Los espacios entre membranas representan los caminos de los flujos concentrados y desmineralizados respectivamente. Los iones se transportan cuando una diferencia de potencial es aplicada entre ambos electrodos, los aniones se mueven hacia el ánodo y los cationes se

mueven hacia el cátodo. Los cationes son atraídos por las membranas de intercambio de cationes, y son retenidos por las membranas de intercambio de aniones y los aniones en forma viceversa. La dirección de este movimiento cambiará debido a que se invertirá la polaridad cada cierto tiempo. Esta migración produce una elevación en la concentración de iones en el compartimiento de concentrado y la disminución en el compartimiento del diluido.

FIGURA N° 4.5
TRANSPORTE DE IONES A TRAVÉS DE LAS MEMBRANAS
IÓNICO.



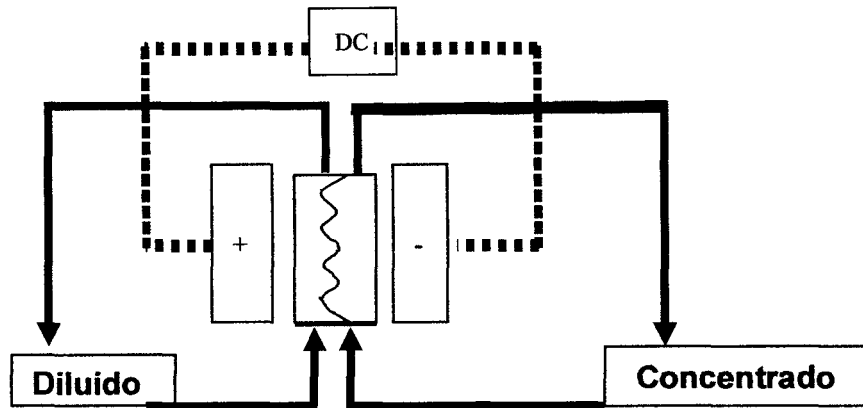
Fuente: Elaboración Propia-2015

4.4. Clasificación de los Procesos de Electrodiálisis

4.4.1. Proceso Batch

Este tipo de sistema de ED, la fuente de agua se recircula desde un tanque, la tasa de producción depende de la concentración de minerales disueltos y el grado de desmineralización.

FIGURA N° 4.6
DIAGRAMA DE PROCESO POR LOTES.

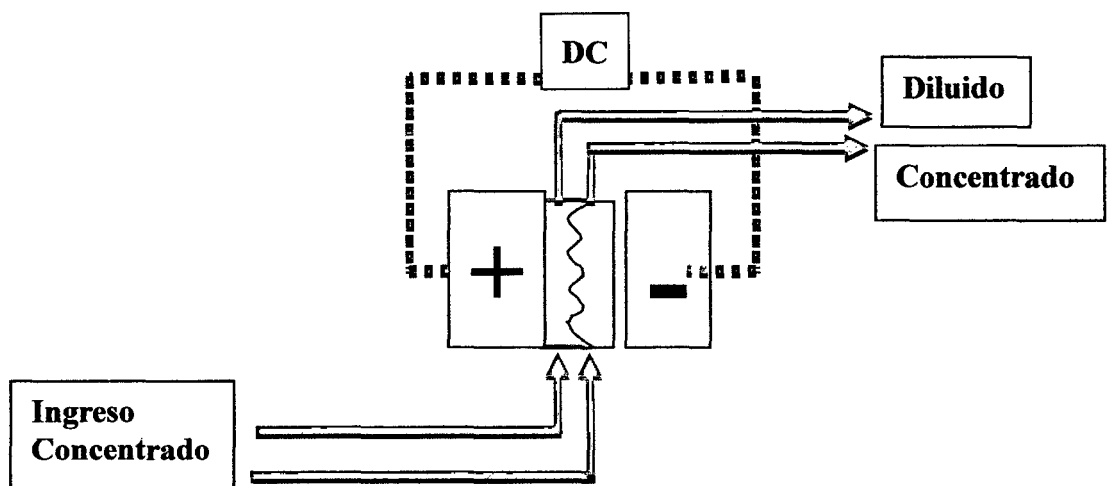


Fuente: Elaboración Propia-2015

4.4.2. Proceso Continuo:

Los sistemas de ED son unidireccionales, los cationes, se mueven hacia el cátodo y los aniones se mueven hacia el ánodo. En los sistemas de ED unidireccionales, se consigue la prevención de incrustaciones.

FIGURA N° 4.7
DIAGRAMA DE PROCESO CONTINUO



Fuente: Elaboración Propia-2015

4.5. Polarización por Concentración

La polarización de concentración es un fenómeno de gradiente de concentración, que se presenta en el interfaz entre la membrana de intercambio iónico y la solución del electrolítica. La causa principal de la polarización de concentración en la celda es el resultado de la reducción de la concentración en la capa de límite de solución diluida y de la diferencia del número de transporte del ion entre la membrana y solución. El transporte de ion a través de la membrana lleva a un agotamiento de iones en la capa límite en la superficie de la membrana en la celda de la corriente diluida y un aumento de iones en la capa de límite laminar en las superficies de la membrana en la celda de la solución del concentrado (Strathmann, 1991).

4.6. Corriente Limite

Uno de los parámetros más importantes a considerar en el diseño del equipo de electrodiálisis es la corriente límite ($L_{lim.}$) su adecuada determinación permite que no ocurra el proceso de polarización y la hidrólisis del agua que ocasionaría la disminución del rendimiento del proceso.

La corriente limite es máxima corriente que se puede utilizar en el proceso de la electrodiálisis, fuera de ello causa efectos negativos como, aumento de la resistencia eléctrica, baja eficiencia eléctrica y disociación del agua (Strathmann, 1992). Cuando la concentración de iones en la superficie de la membrana en la zona diluida se vuelve cero, la densidad de corriente se aproxima al máximo valor en el proceso, lo cual es definido como la densidad de corriente limite.

La densidad de corriente límite es proporcional a la concentración de iones en el diluido y al coeficiente de transferencia de masa .su valor deberá ser determinado experimentalmente.

La densidad de corriente fue sugerida a ajustarse al valor el cual corresponde a 70-80% de la densidad de corriente límite.

Cuando la concentración en el diluido se hace más pequeña, (hay insuficiente iones) Incrementando los valores de voltaje se logra la disociación del agua en la membrana.

4.7. Determinación de la Corriente Limite

La corriente límite es determinada experimentalmente para una construcción específica de pila y geometría de espaciador como una función de la velocidad de flujo de solución y concentración. Esto puede ser descrito de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$I_{lim} = aCu^b$$

i_{lim} : Corriente límite (A)

u : Velocidad de flujo lineal (m/s)

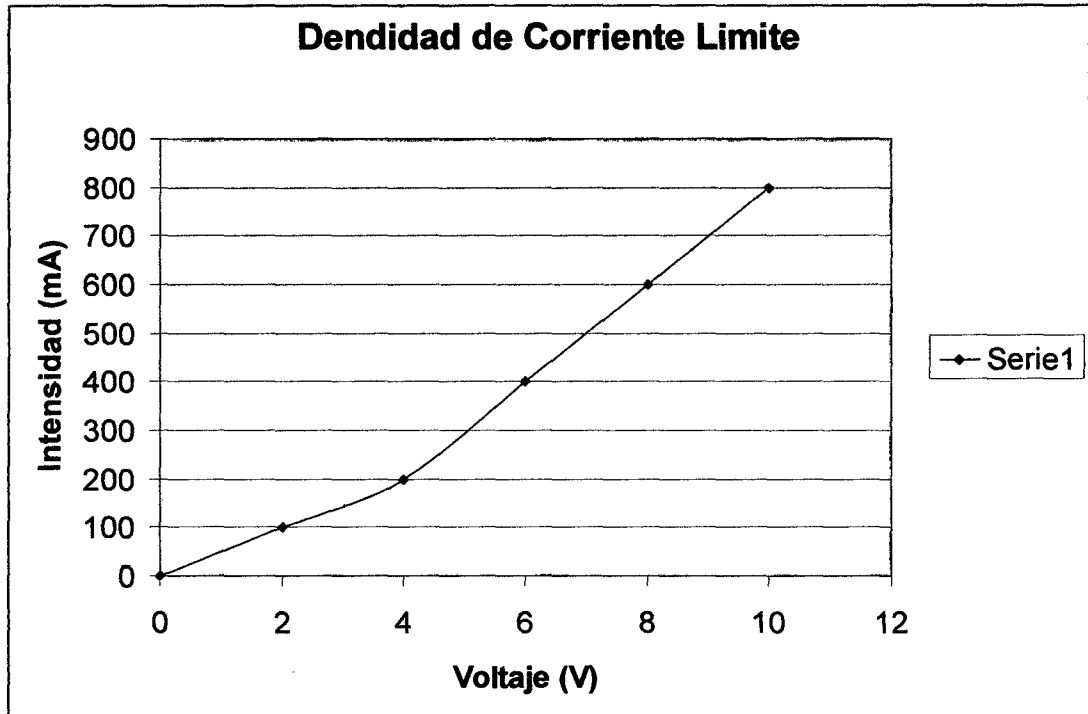
a, b : Constantes las cuales son determinadas por mediciones de la densidad de corriente de limite en varias velocidades de flujo lineal (H.J Lee y Colaboradores). La ecuación empírica indicada, es ampliamente aceptada para el diseño de una celda de electrodiálisis. Un factor de seguridad (s) es introducido y la corriente límite usada es dada por:

$$I_{lim} = saCu^b$$

s : factor de seguridad el cual siempre es $s < 1$



GRAFICA N° 4.1
CURVA PARA DETERMINAR LA CORRIENTE LIMITE



Fuente: Elaboración Propia-2015

4.8. Derivación de la Ecuación de la Densidad de Corriente Limite

La relación entre la densidad de corriente limite y parámetros del proceso, como propiedades de la membrana, concentración de la celda diluida puede ser expresado por la relación siguiente.

$$I_{lim} = \frac{CzFD}{(t_m - t_s)\delta}$$

C es la concentración de la solución diluida, D es el coeficiente de difusión del electrolito, Z: valencia de los iones en la solución, F es la constante de faraday, σ Espesor de la capa limite, t_m Número de transporte de iones en la membrana, t_s Número de transporte de iones en la solución, Δt_j es la diferencia entre el numero de transporte de contraiones en la membrana y solución.

$$I_{lim} = \frac{CzFD}{(t_m - t_s)\delta} = \frac{zFC}{(t_m - t_s)} k$$

k coeficiente de transferencia de masa La densidad de corriente eléctrica es proporcional a la concentración de iones en La celda diluida y al coeficiente de transferencia de masa, el coeficiente de transferencia de masa en una celda de electrodiálisis es difícil de determinar por una medición independiente. Por lo tanto, la ecuación no es adecuada para calcular la densidad de corriente límite para el diseño de una celda de electrodiálisis. Sin embargo, la densidad de corriente límite puede ser estimada fácilmente de manera precisa mediante ecuaciones empíricas.

La cual relaciona el coeficiente de transferencia de masa a la velocidad de flujo de la solución diluida en una función exponencial.

El coeficiente de transferencia de masa K_s es una función de la geometría del canal de flujo, el diseño del espaciador, velocidad de flujo, etc. Este puede ser relacionado al número de Sherwood y puede ser expresado por una función no lineal de la velocidad de flujo.

$$k = Q^b$$

Donde b es una constante dependiendo de la construcción de la celda y espaciador y teniendo un valor de 0,5 a 1.

4.9. Diámetro Hidráulico (D_H)

Es un término comúnmente utilizado para manipular el flujo en tubos circulares y canales. Utilizando éste término se puede estudiar el comportamiento del flujo de la misma forma como si fuera una tubería de sección circular. . Se define como

$$D_H = \frac{4A}{P}$$

donde A es la sección transversal del ducto y P es el perímetro mojado. Para un tubo circular, queda como:

$$D_H = \frac{4\pi D^2}{\pi D} = D$$

para un conducto de sección rectangular:

$$D_H = \frac{4LW}{2(L+W)} = \frac{2LW}{L+W}$$

Para el caso especial de un conducto cuadrado, donde $L = W$, entonces $D_H = L$

Para el otro caso límite de un amplio conducto, es decir, una ranura de anchura W , donde $W \gg L$, entonces

$$D_H = 2L$$

Sobre la base de la ecuación (1) el diámetro hidráulico de un conducto rectangular o tubería puede calcularse como

$$D_H = \frac{4ab}{2(a+b)}$$

4.10. Numerosa Adimensionales para Determinar el Coeficiente de Transferencia de Masa

4.10.1. Numero de Reynolds (Re)

Las investigaciones de Osborne Reynolds han demostrado que el régimen de flujo en tuberías, es decir, si es laminar o turbulento, depende del diámetro de la tubería, de la densidad y la viscosidad del fluido y de la velocidad del flujo. El valor numérico de una combinación adimensional de estas cuatro variables,

conocido como el número de Reynolds, puede considerarse como la relación de las fuerzas dinámicas de la masa del fluido respecto a los esfuerzos de

$$Re = \frac{v_s D_H}{\nu}$$

deformación ocasionados por la viscosidad. De acuerdo a la ecuación 6 el número de Reynolds, Re , se determina como:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

ρ : densidad del fluido (kg/m^3), v_s : velocidad característica del fluido

D_H : diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido o longitud característica del sistema, μ : viscosidad dinámica del fluido

ν : viscosidad cinemática del fluido (m^2/s)

4.10.2. Numero de Schmidt (Sc)

Es un número adimensional definido como el cociente entre la difusión de cantidad de movimiento y la difusión de masa, y se utiliza para caracterizar flujos en los que hay procesos convectivos de cantidad de movimiento y masa. Se llama así en honor al ingeniero alemán Ernst Heinrich Wilhelm Schmidt (1892-1975). El número de Schmidt relaciona los grosores de las capas límite de cantidad de movimiento y de masa. Se define como:

$$Sc = \frac{v}{D} = \frac{\mu}{\rho D}$$

En donde:

- D_{AB} es la difusividad másica del componente en el agua

4.10.3. Numero de Sherwood

El **Número de Sherwood (Sh)** es un número adimensional utilizado en transferencia de masa. Representa el cociente entre la transferencia de masa por convección y difusión. Se llama así en honor a Thomas Kilgore Sherwood.

Se define como:

$$Sh = \frac{kD_H}{D_{AB}}$$

En donde:

k es el coeficiente global de transferencia de masa. D_H es una longitud característica. D_{AB} es la difusividad del soluto en el agua

4.11. Calculo del Coeficiente de Transferencia de Masa

En los cálculos que se realizan en el estudio de la transferencia de masa se suele definir un parámetro que agrupa todos los efectos convectivos y difusivos, este es el coeficiente de transferencia de masa (k_c); de tal manera que el flujo total sea proporcional a un gradiente de concentraciones (o composiciones), donde dicho coeficiente es la constante de proporcionalidad, que además es inversamente proporcional al espesor de la capa en la cual se efectúa la transferencia.

Con el fin de hallar el coeficiente de transferencia de masa se utiliza la siguiente correlación empírica para módulos de electrodiálisis.

$$Sh = aRe^bSc^c$$

Que correlaciona el número de Sherwood, en función del número de Reynolds, y el número de Schmidt,

$$Sh = 1,85 \left(Re \cdot Sc \frac{Dh}{L} \right)^{0,33}$$

Donde:

Sh es el número de Sherwood, Re número de Reynolds, Sc número de Schmidt, D_H es el diámetro hidráulico, El coeficiente de transferencia de masa (k) se puede calcular a través del número Sherwood mediante la ecuación.

$$k = \frac{ShD}{D_h}$$

4.12. Transporte de Masa usando las Ecuaciones de NERNST-PLANCK

El desplazamiento de los iones sodio y cloruro de una solución a través de membrana de intercambio iónico; combina tres diferentes fuerzas en el transporte de masa por: difusión, electro migración y convección. Mediante la ecuación de de Nernst-Planck. para la especie y viene representado mediante la ecuación. La ecuación de Nernst-Planck utiliza las leyes de Fick, Ohm, Darcy

Flujo = difusión + convección + migración

$$J_i = J_d + J_m + J_c$$

$$J_i = -D_i \frac{dC_i}{dx} + \left(-\frac{z_i F D_i C_i}{RT} \frac{d\Phi}{dx} \right) + C_i v$$

La contribución de transporte convectivo puede ser obviarse quedando la siguiente ecuación.

$$J_i = -D_i \frac{dC_i}{dx} + \left(-\frac{z_i F D_i C_i}{RT} \frac{d\Phi}{dx} \right)$$

Donde:

D_i : coeficiente de difusión de la especie iónica

C_i : concentración de la especie iónica

Z_i : carga eléctrica del ion

F: constante de faraday (96500A.s/ mol)

R: constante universal de los gases(8,314 j / molK)

Φ : potencial eléctrico T: Temperatura absoluta

4.13. Métodos de Análisis de Datos

4.13.1. Relación entre Concentración y Conductividad

La concentración de sólidos totales disueltos en el agua a partir de la conductividad., se relaciona mediante la siguiente ecuación

$$STD = \frac{Cd}{2}$$

STD: Concentración de sólidos totales disueltos (mg/L).

Cd: Conductividad (us/cm).

4.13.2. Grado de Desalinización

Un factor importante en el funcionamiento de un equipo de electrodiálisis es el grado de realización que indica el porcentaje de separación de sales y se calcula mediante la siguiente relación.

$$S = \left(\frac{C_{t=0} - C_{t=t}}{C_{t=0}} \right) \times 100\%$$

V. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se indican los instrumentos, equipos y especies químicas que forman parte del módulo de electrodiálisis

5.1. Materiales

5.1.1. Membranas

Dos membranas de intercambio catiónico FTCM – E y una membranas de intercambio aniónico FTAM-E de área de 150 cm² cada una, fueron usadas en el equipo de electrodiálisis.

TABLA N° 5.1:

PROPIEDADES DE LAS MEMBRANAS DE INTERCAMBIO IONICO.

MEBRANA DE INTERCAMBIO IONICO	FTCM –E	FTAM-E
Manufactura	FUMA-TECH	FUMA-TECH
Resistencia eléctrica (Ω / cm^2) a 25°C	2,5 – 3,5	2,5 - 3,5
Capacidad de intercambio iónico (meq/g Tipo	1,5 -1,8	1,4 -1,7
Espesor(mm)	Acido fuerte	Base débil
	0,17 - 0,19	0,16 -0,18

FIGURA N° 5.1

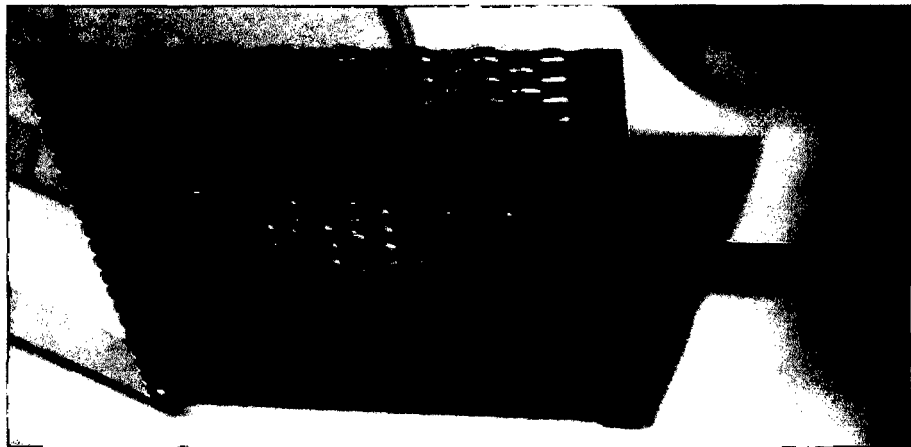
MEMBRANA DE INTERCAMBIO CATIÓN

Fuente: Elaboración Propia-2015

5.1.2. Electrodo

- Ánodo de titanio de 10cm x5cm.
- Cátodo de Titanio de 10cm x 5cm

FIGURA 5.2
ÁNODO DE TITANIO

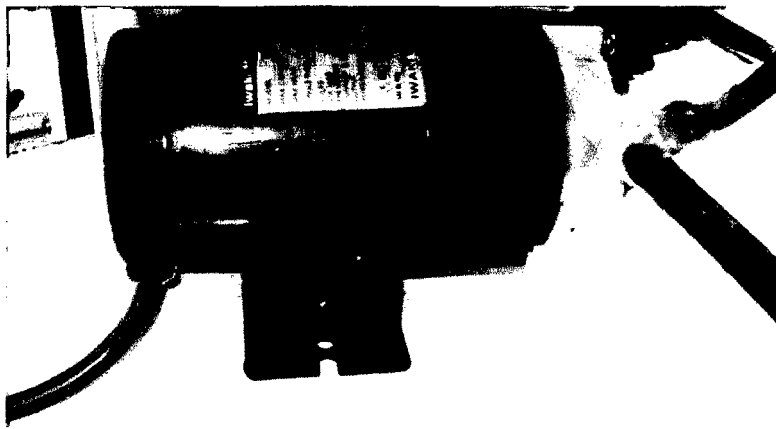


Fuente: Elaboración Propia-2015

5.1.3. Bombas Centrífugas

Tres bombas de 110 V de alimentación con sus respectivos transformadores

FIGURA N° 5.3
BOMBA CENTRIFUGA

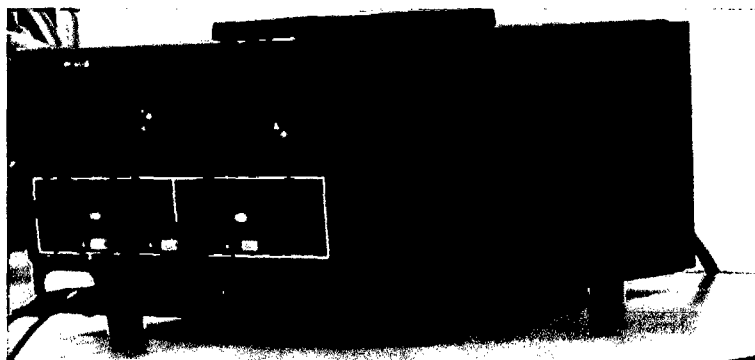


Fuente: Elaboración Propia-2015

5.1.4. Fuente Eléctrica

Fuente de alimentación de corriente continúa, el voltaje es manipulado desde la misma fuente cuyo rango es de (0 a 30 voltios).

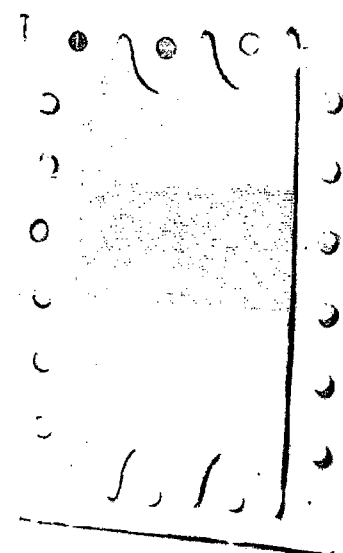
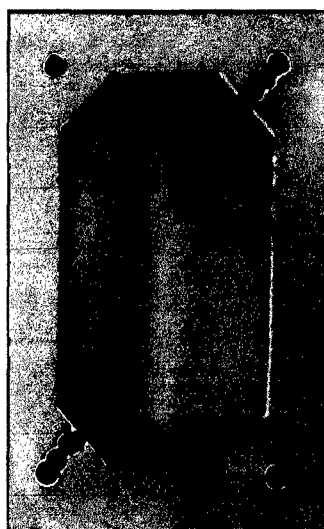
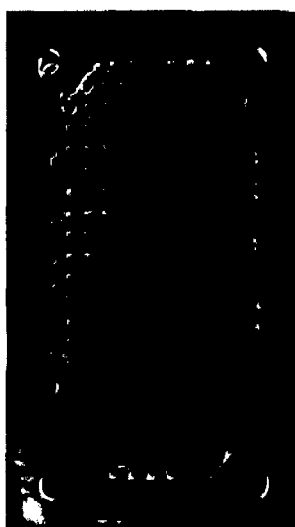
FIGURA N° 5.4
FUENTE ELÉCTRICA CONTINUA



Fuente: Elaboración Propia-2015

5.1.5. Espaciadores

FIGURA N° 5.5
ESPACIADORES DE FLUJO (A,B,C)



Fuente: Elaboración Propia-2015

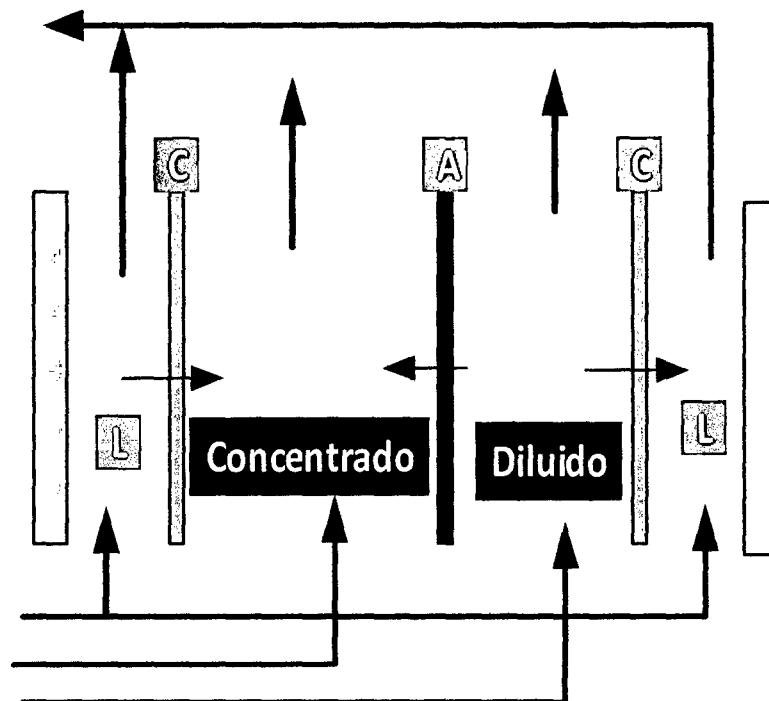
5.1.6. Reactivo Químico:

Los reactivos que se utilizaron fueron de grado analítico, cloruro de sodio, sulfato de sodio y Fenolftaleína, el agua utilizada, fue producida mediante un equipo de osmosis inversa, que se encuentra en el LOPU cuya conductividad del agua fue de 5 us

5.1.7. Configuración de las membranas en la celda de Electrodiálisis

La disposición de las membranas, permite que se creen tres compartimentos: celda de concentrado, diluido y lavado de electrodos. (L) como se indica en la figura N° 3.14

FIGURA N° 5.6
CONFIGURACIÓN DE LAS MEMBRANAS



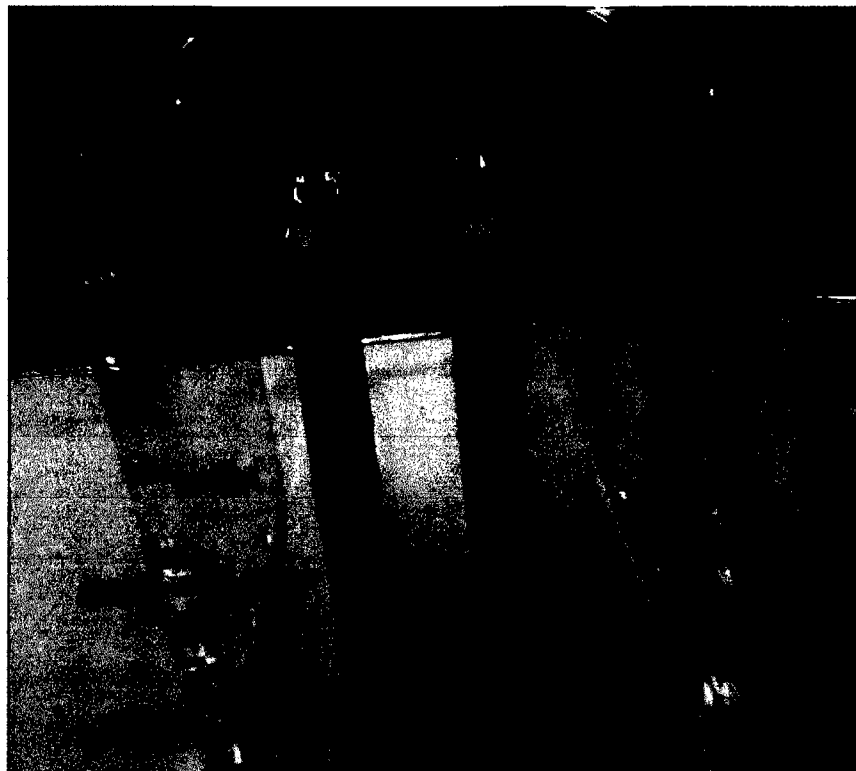
Fuente: Elaboración Propia-2015

5.1.8. Ensamblaje del Equipo Experimental

Se observa dos placas de material de acrílico con dos entradas y salidas para las corrientes diluido y concentrado, así mismo dos placas de porta electrodos con sus respectivas entradas y salidas de solución de lavado de electrodos

FIGURA N° 5.7

ENSAMBLAJE DEL EQUIPO EXPERIMENTAL



Fuente: Elaboración Propia-2015

5.1.9. Equipo Experimental

El equipo de electrodiálisis de tipo filtro prensa (placas y marco) fue construido con dos placas de acrílico sobre el que se colocan tres membranas (dos catiónicas y una anionica), afianzado con 8 barras transversales con tuercas para prevenir fuga o derrame del líquido desde una celda a otra. Como se muestra en la Figura 5.8. El modulo

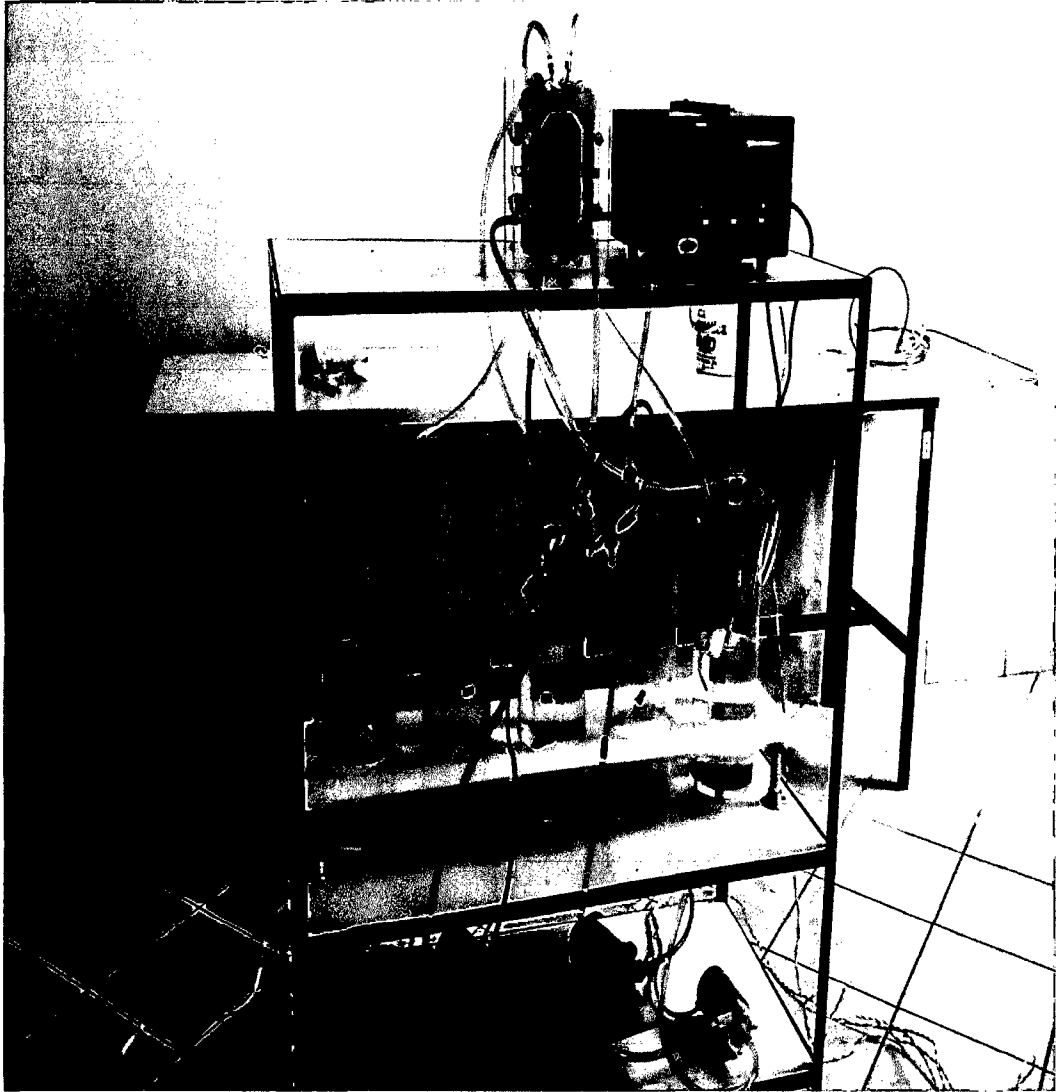
contiene dos porta electrodos de material de nylon donde se ha colocado dos electrodos, cada placa contiene una entrada y salida para la solución de lavado de los electrodos.

Tres espaciadores de jebe de material sanitario, fueron colocados entre cada membrana. Que permite sellar y mantener la distribución uniforme de flujo dentro de las celdas. La celda tiene dos placas de acrílico en los extremos cada una con dos entradas y dos salidas para el flujo de las soluciones.

Las soluciones de cloruro de sodio fueron circuladas dentro de los compartimientos mediante una bombas centrifuga. Para regular el flujo volumétrico se colocaron tres válvulas en línea y una tubería de re ciclo para regular el flujo en cada corriente. El ánodo y el cátodo son colócalos en los extremos de la celda y son colocados al polo positivo y negativo de la fuente eléctrica, contiene una área efectiva de transferencia de 85 cm^2 , y una superficie total de la membrana de 255 cm^2 . El equipo experimental contiene los siguientes elementos 3 tanques de material acrílico de capacidad de 2 litros (13 cm de diámetro y 27 m de altura), una estructura metálica. De hierro fundido pintado de color azul ,3 bombas de 0,25 HP, válvulas de paso para controlar el flujo de la solución, conectores rápidos con entrada manguera/manguera , codos de plástico de 10 mm. de diámetro, 3 Transformadores de 150 watts 110 voltios, 3 membranas de intercambio iónico



FIGURA N° 5.8
EQUIPO EXPERIMENTAL



Fuente: Elaboración Propia-2015

5.2. Población y Muestra

Se prepararon 30 litros de soluciones a partir de de cloruro de sodio de grado analítico, distribuidos en 10 litros de 1g/L, 10 litros de 2g/L y 10 litros de 3 g/L de concentración, Se prepararon 10 litros de sulfato de sodio de 0,05 M utilizado como lavado de los electrodos. Para las pruebas experimentales se ha tomado una muestra de 1 litro de solución y se ha adicionado a cada tanque para cada una de las experiencias.

5.3. Diseño Experimental

Para el desarrollo de las pruebas experimentales, se ha planteado el diseño experimental con tres variables(flujo, potencial eléctrico y tipo de espaciador) a tres niveles como se indica en la Tabla N° 4.2 y como variable respuesta el cálculo de coeficiente de transferencia de masa

TABLA N° 5.2
PARAMETROS Y NIVELES DE OPERACIÓN

N°	Parámetros	Unidad	Factor	Nivel bajo (1)	Nivel Medio (2)	Nivel alto (3)
1	Concentración de NaCl	g/L	X1	1	2	3
3	Flujo	mL/min.	X2	200	300	400
3	Potencial Eléctrico	V	X2	10	15	20
4	Tipo de espaciador		X4	A	B	C

Fuente: Elaboración Propia-2015

TABLA N° 5.3
DISEÑO DEL PLAN DE EXPERIMENTACIÓN MEDIANTE
METODOLOGIA TAGUCHI

N°	X1	X2	X3	X4	X1	X2	X3	X4	Y
1	1	1	1	1	1	200	10	A	Y1
2	1	2	2	2	1	300	15	B	Y2
3	1	3	3	3	1	500	20	C	Y3
4	2	1	2	3	2	200	15	C	Y4
5	2	2	3	1	2	300	20	A	Y5
6	2	3	1	2	2	500	10	B	Y6
7	3	1	3	2	3	200	20	B	Y7
8	3	2	1	3	3	300	10	C	Y8
9	3	3	2	1	3	500	15	A	Y9

Fuente: Elaboración Propia-2015

5.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

5.4.1 Técnicas

La técnica que se utilizó en la investigación es la observación directa de la lectura indicada por el instrumento.

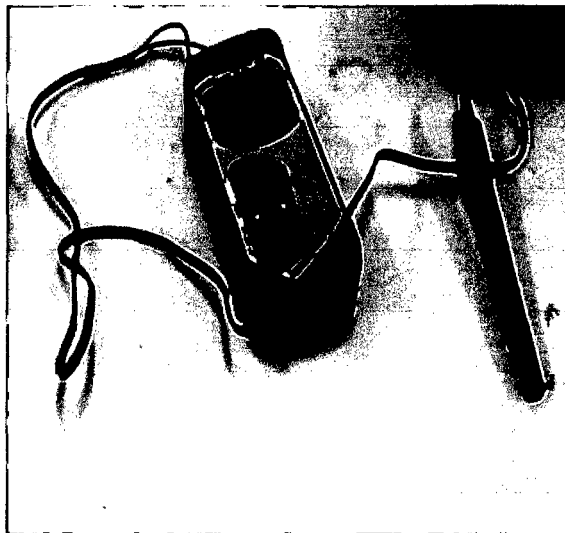


5.4.2 Instrumentos de Medición

Para el desarrollo de las pruebas experimentales se utilizaron los siguientes instrumentos de medición:

- Cronómetro para medir el tiempo de circulación de las soluciones, cambio de la polaridad y lecturas de conductividad cada 10 min.
- Cronometro para medir el flujo volumétrico en cada corriente
- Multitéster para monitorear la corriente y voltaje durante el proceso.
- Conductímetro para las lecturas de conductividad.

FIGURA 5.9
CONDUCTIMETRO



Fuente: Elaboración Propia-2015

5.5. Métodos de Análisis de Datos

En esta investigación se realizó el análisis correlacional de los datos cuantitativos obtenidos, mediante el software Microsoft

Excel 2013 para ver su efecto de los espaciadores respecto a la velocidad lineal de la solución diluida y el software Minitab, para analizar el porcentaje de separación de cloruro de sodio con respecto a los parámetros de operación del modulo de electrodiálisis.

5.6. Metodología

5.6.1. Determinación de la Corriente Limite

Se realizó un ensayo para cada espaciador manteniendo constante los flujos y concentraciones de las soluciones, se inició la prueba con un potencial de 2 voltios y se midió la corriente eléctrica en forma inmediata, se incrementó el voltaje cada 10 min. Hasta alcanzar 20 voltios. Los tres experimentos fueron realizados a temperatura ambiente, usando soluciones de lavado de 0,05 M de Na_2SO_4

TABLA N° 5.4
PARÁMETROS DE OPERACIÓN EN LA DETERMINACIÓN DE LA
CORRIENTE LÍMITE

Prueba N°	Concentración de NaCl (g/l)	flujo (mL/min.)	tipo de espaciador
1	3	200	A
2	3	200	B
3	3	200	C

Fuente: Elaboración Propia-2015

5.6.2. Porcentaje de Separación de Cloruro de Sodio

Para la determinación del porcentaje de separación del cloruro de sodio se utilizó el diseño de experimentos como se indica en la tabla N° 5.3 Se realizaron en total 9 experimentos sin ninguna réplica.

Se midió en forma simultánea la conductividad de una muestra de 30 mL aproximadamente extraída de cada tanque cada 10 min.

Para eliminar la acumulación de la polarización se invierte la polaridad al cabo de 60 min por espacio de 1min



VI. RESULTADOS

En este capítulo se presenta las curvas de corriente eléctrica y voltaje para el cálculo de la corriente límite, graficas del cambio de conductividad del concentrado y diluido para diferentes parámetros de operación así mismo el coeficiente de transferencia de masa

6.1. Determinación de la Corriente Límite

TABLA N° 6.1

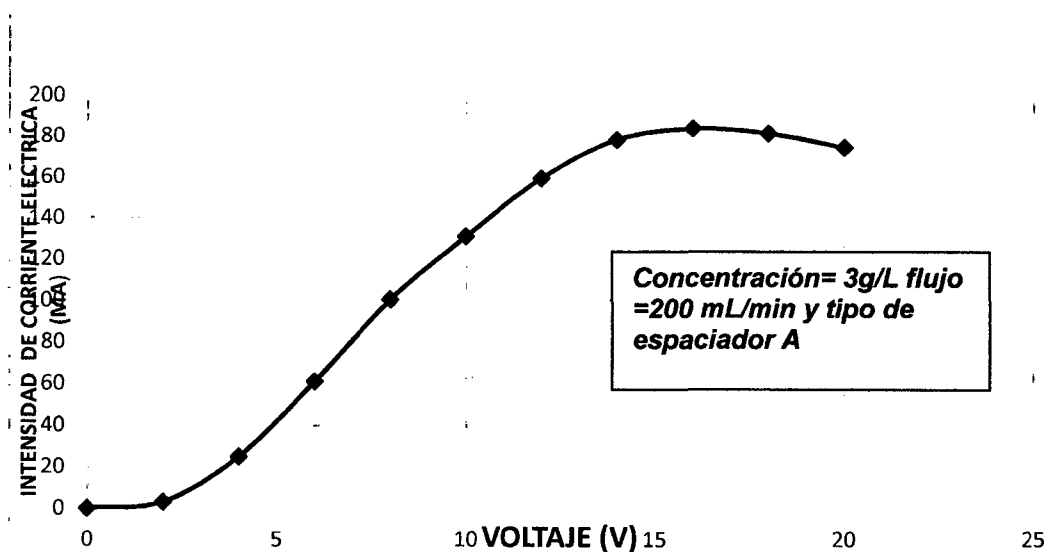
INTENSIDAD DE CORRIENTE ELÉCTRICA - VOLTAJE

N ^a	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Voltaje (V)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Intensidad de corriente (mA)	0	3,1	25	61,5	100	130	159	178	179	181,3	185	174,4

Fuente: Elaboración Propia-2015

GRAFICA N° 6.1

INTENSIDAD DE CORRIENTE - VOLTAJE



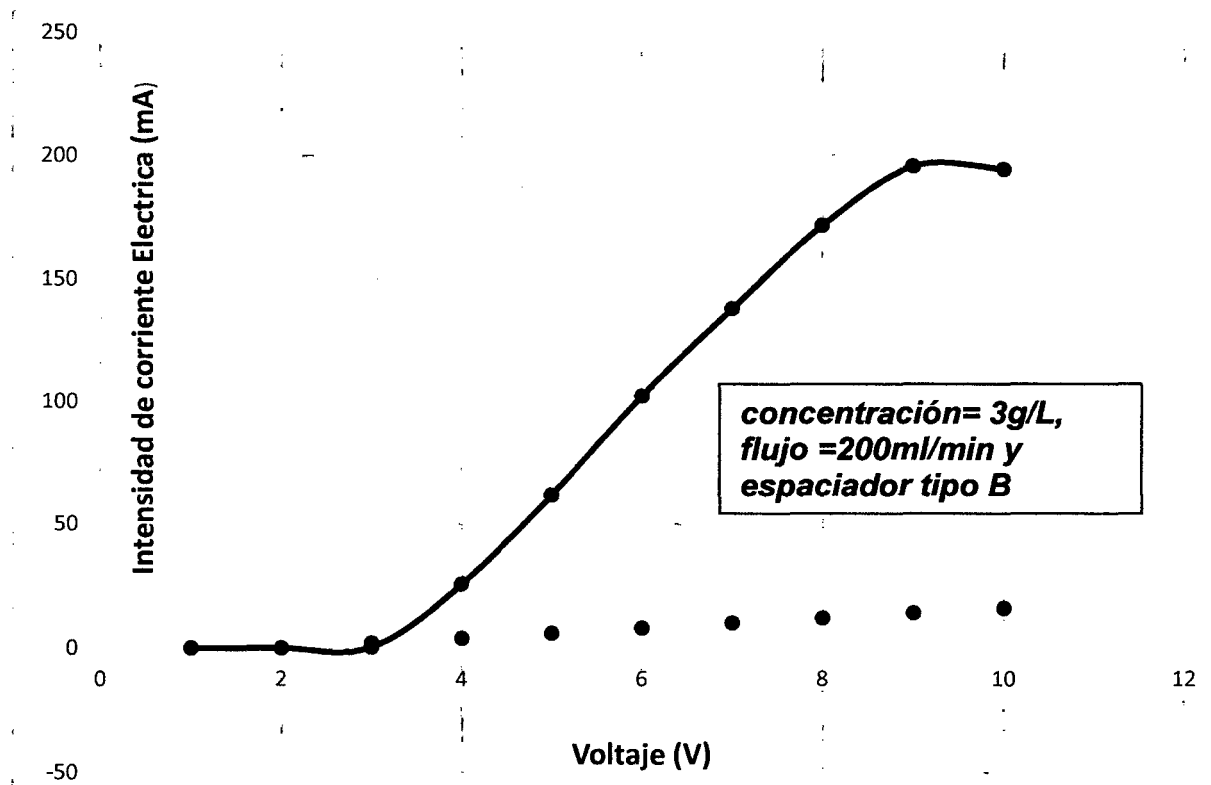
Fuente: Elaboración Propia-2015

TABLA N° 6.2
INTENSIDAD DE CORRIENTE ELÉCTRICA - VOLTAJE

N^a	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Voltaje (V)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
Intensidad de corriente (mA)	0	0,3	25,6	61,8	102,2	137,8	171,5	195,4	194,1

Fuente: Elaboración Propia-2015

GRAFICA N° 6.2
RELACIÓN INTENSIDAD DE CORRIENTE - VOLTAJE



Fuente: Elaboración Propia-2015

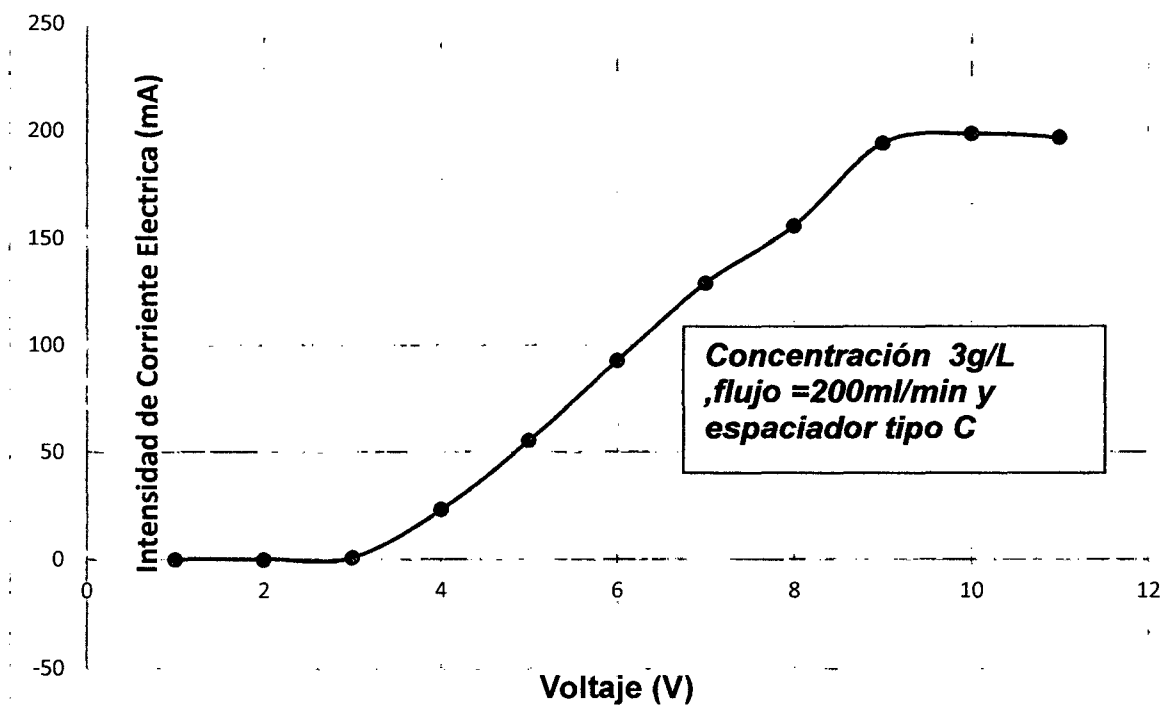


TABLA N° 6.3
INTENSIDAD DE CORRIENTE ELÉCTRICA - VOLTAJE

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Voltaje (V)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Intensidad de corriente (mA)	0	0,8	22,9	55,9	92,6	128,8	155,5	193,8	198,2	196,5

Fuente: Elaboración Propia-2015

GRAFICA N° 6.3
RELACIÓN INTENSIDAD DE CORRIENTE - VOLTAJE



Fuente: Elaboración Propia-2015

6.2. PORCENTAJE DE SEPARACIÓN EN LOS COMPARTIMIENTOS

TABLA N° 6.4:

CONDUCTIVIDAD – TIEMPO

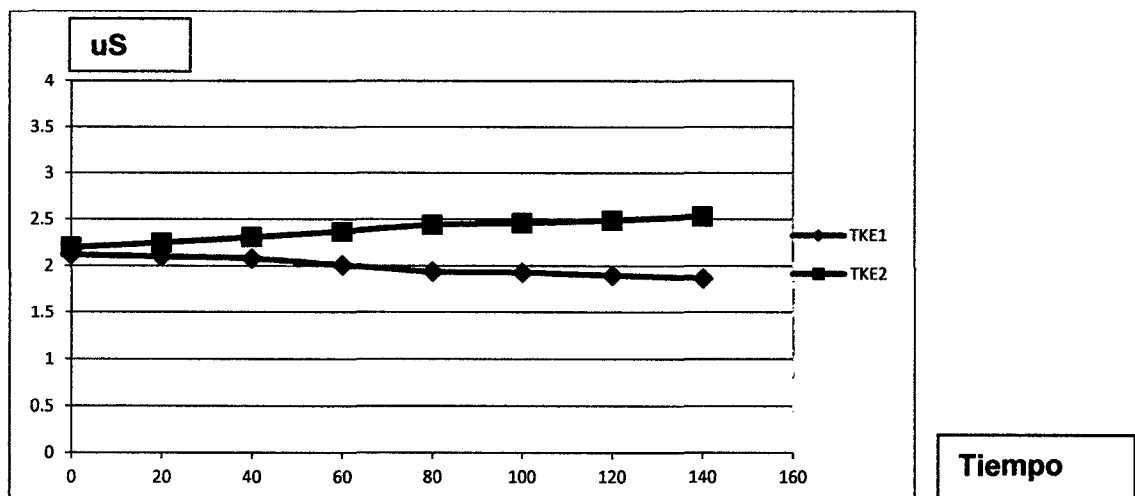
X1= 1g/L ,X2 =200 ml/min , X3= 10 , X4 tipo A

Tiempo(min)	Conductividad (mS)		
	Diluido	Concentrado	Lavado
	Tk 1	Tk 2	Tk 3
0	2.12	2.20	3.92
20	2.10	2.25	3.92
40	2.08	2.31	3.92
60	2.01	2.37	3.92
80	1.946	2.44	3.92
100	1.931	2.46	3.94
120	1.904	2.49	3.92
140	1.873	2.53	3.93

Fuente: Elaboración Propia-2015

GRAFICA N° 6.4

CONDUCTIVIDAD DEL CONCENTRADO Y DILUIDO



Fuente: Elaboración Propia-2015

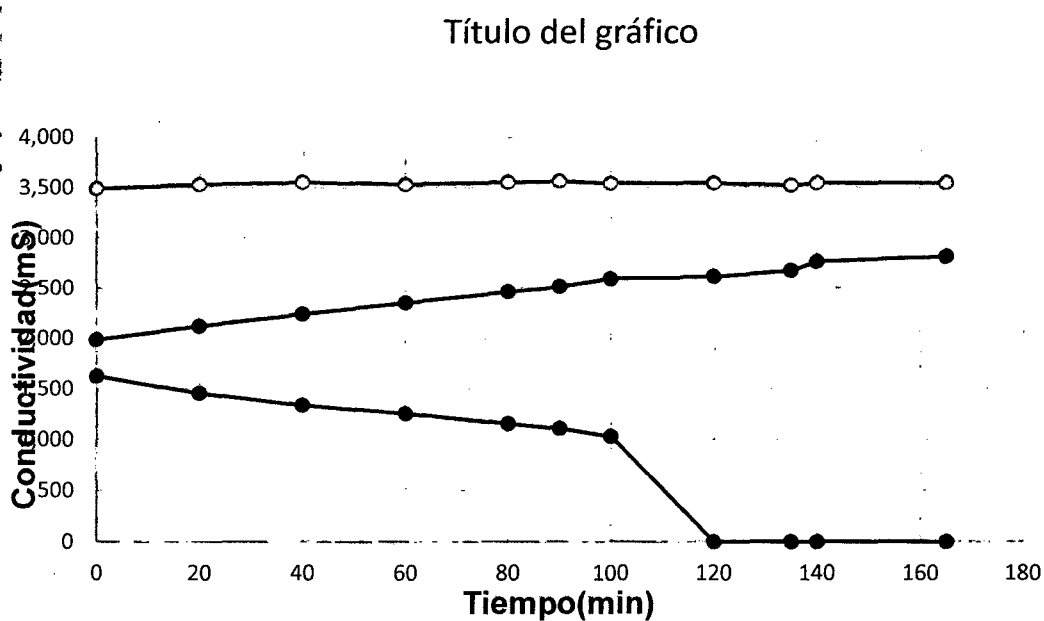
TABLA N° 6.5:
CONDUCTIVIDAD – TIEMPO

X1= 1g/l, X2 = 300 mL/min. X3= 15, y tipo de espaciador B

Tiempo(min)	0	20	40	60	80	90	100	120	135	150	165
<i>Tke1 (Diluido) mS</i>	1,62	1,45	1,33	1,25	1,15	1,10	1,02	0,99	0,90	0,87	0,80
<i>Tke2 (Concen) mS</i>	1,98	2,12	2,24	2,35	2,46	2,51	2,59	2,61	2,67	2,76	2,81
<i>Tke3 (lavado) mS</i>	3,49	3,53	3,55	3,53	3,55	3,56	3,54	3,54	3,52	3,54	3,54

Fuente: Elaboración Propia-2015

GRAFICA N° 6.5
CONDUCTIVIDAD DEL CONCENTRADO Y DILUIDO



Fuente: Elaboración Propia-2015

TABLA N° 6.6:

CONDUCTIVIDAD – TIEMPO

Concentración= 1g/L voltaje= 20 ,flujo =500ml/min, y tipo de espaciador C

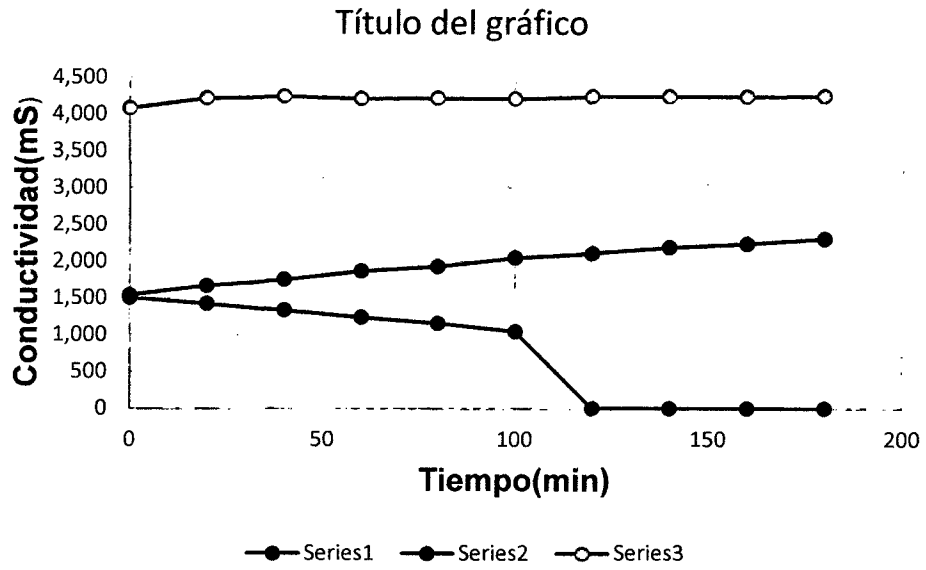
t (min)	CONDUCTIVIDAD (mS)		
	Diluido TK ₁	Concentrado TK ₂	Lavado TK ₃
0	1.506	1.541	4.080
20	1.426	1.670	4.220
40	1.335	1.751	4.240
60	1.239	1.868	4.210
80	1.159	1.932	4.220
100	1.050	2.050	4.210
120	0.978	2.110	4.240
140	0.902	2.190	4.240
160	0.823	2.240	4.240
180	0.752	2.310	4.250

Fuente: Elaboración Propia-2015



GRAFICA N° 6.6

CONDUCTIVIDAD DEL CONCENTRADO Y DILUIDO



Fuente: Elaboración Propia-2015

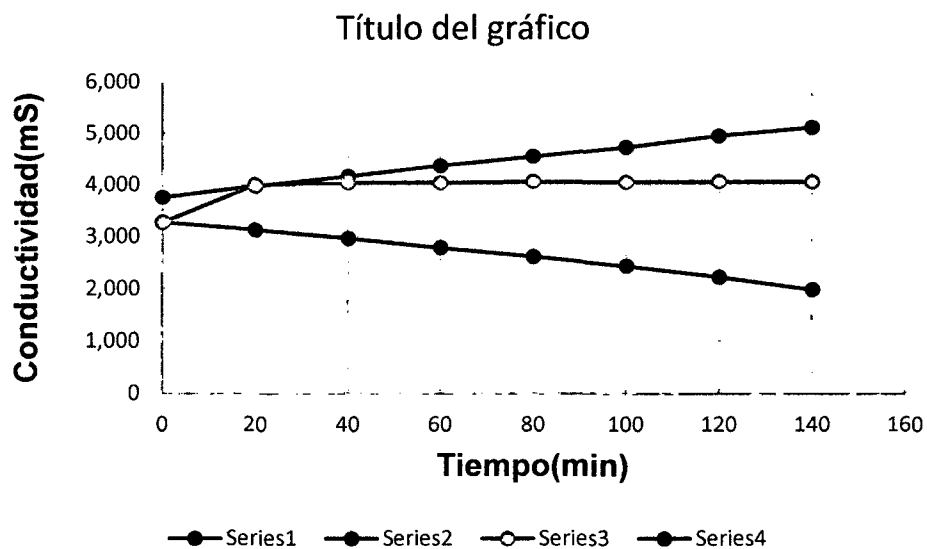
TABLA N° 6.7:
CONDUCTIVIDAD – TIEMPO

Concentración= 2g/L , voltaje= 10 flujo = 500 ml/min, y tipo de espaciador B

t (min)	CONDUCTIVIDAD (mS)		
	Diluido	Concentrado	Lavado
	TK ₁	TK ₂	TK ₃
0	3.270	3.750	3.260
20	3.120	3.970	4.000
40	2.960	4.160	4.040
60	2.780	4.370	4.040
80	2.610	4.550	4.060
100	2.430	4.730	4.050
120	2.220	4.950	4.060
140	1.976	5.110	4.050

Fuente: Elaboración Propia-2015

GRAFICA N° 6.7
CONDUCTIVIDAD DEL CONCENTRADO Y DILUIDO



Fuente: Elaboración Propia-2015

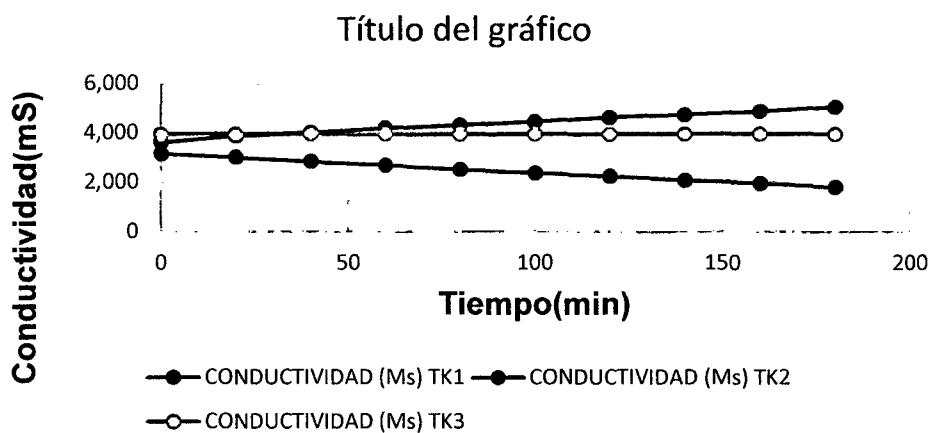
TABLA N° 6.8:
CONDUCTIVIDAD – TIEMPO

Concentración = 2g/L , flujo =200 ml/min, voltaje= 15 y espaciador C

t (min)	CONDUCTIVIDAD (mS)		
	Diluido	Concentrado	Lavado
	TK ₁	TK ₂	TK ₃
0	3.140	3.600	3.930
20	2.990	3.850	3.930
40	2.820	3.990	3.940
60	2.670	4.170	3.920
80	2.500	4.290	3.920
100	2.360	4.430	3.940
120	2.230	4.600	3.920
140	2.080	4.720	3.940
160	1.951	4.850	3.940
180	1.785	5.030	3.930

Fuente: Elaboración Propia-2015

GRAFICA N° 6.8
CONDUCTIVIDAD DEL CONCENTRADO Y DILUIDO



Fuente: Elaboración Propia-2015

TABLA N° 6.9:

CONDUCTIVIDAD – TIEMPO

Concentración= 2g/L flujo =300ml/min y distancia espaciador A y 20 voltios

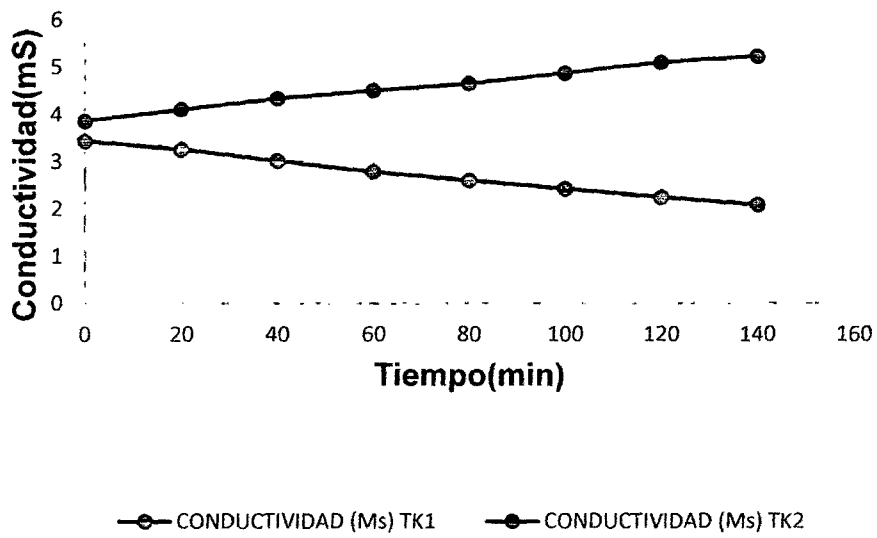
Tiempo(min)	Conductividad (mS)	
	Diluido Tk-1	Concentrado Tk-2
0	3.43	3.86
20	3.25	4.10
40	3.01	4.33
60	2.78	4.50
80	2.60	4.65
100	2.42	4.87
120	2.24	5.09
140	2.08	5.22

Fuente: Elaboración Propia-2015



GRAFICA N° 6.9
CONDUCTIVIDAD DEL CONCENTRADO Y DILUIDO

Título del gráfico



Fuente: Elaboración Propia-2015

TABLA N° 6.10:
CONDUCTIVIDAD – TIEMPO

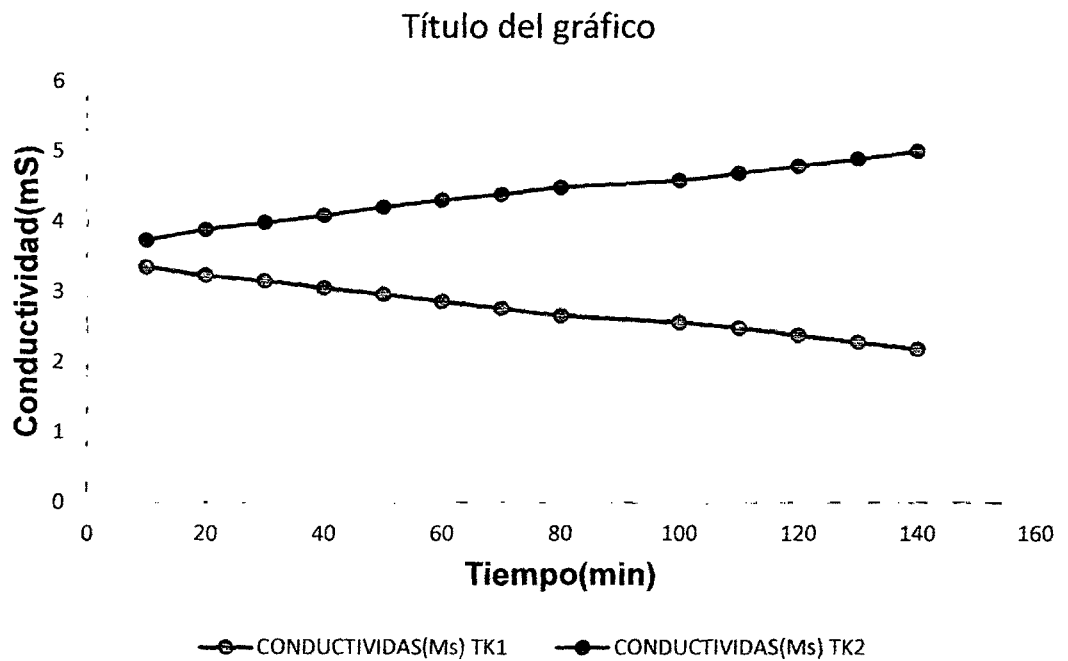
Concentración= 3g/l , flujo =300ml/min, 10 voltios y tipo d espaciador C

Tiempo(min)	Conductividad (mS)	
	Diluido	Concentrado
	Tk-1	Tk-2
10	3.35	3.73
20	3.23	3.88
30	3.15	3.98
40	3.050	4.08
50	2.96	4.20
60	2.86	4.30
70	2.76	4.38
80	2.66	4.48
100	2.56	4.58
110	2.48	4.68
120	2.38	4.78
130	2.28	4.88
140	2.18	4.99

Fuente: Elaboración Propia-2015



GRAFICA N° 6.10
CONDUCTIVIDAD DEL CONCENTRADO Y DILUIDO



Fuente: Elaboración Propia-2015

TABLA N° 6.11

CONDUCTIVIDAD – TIEMPO

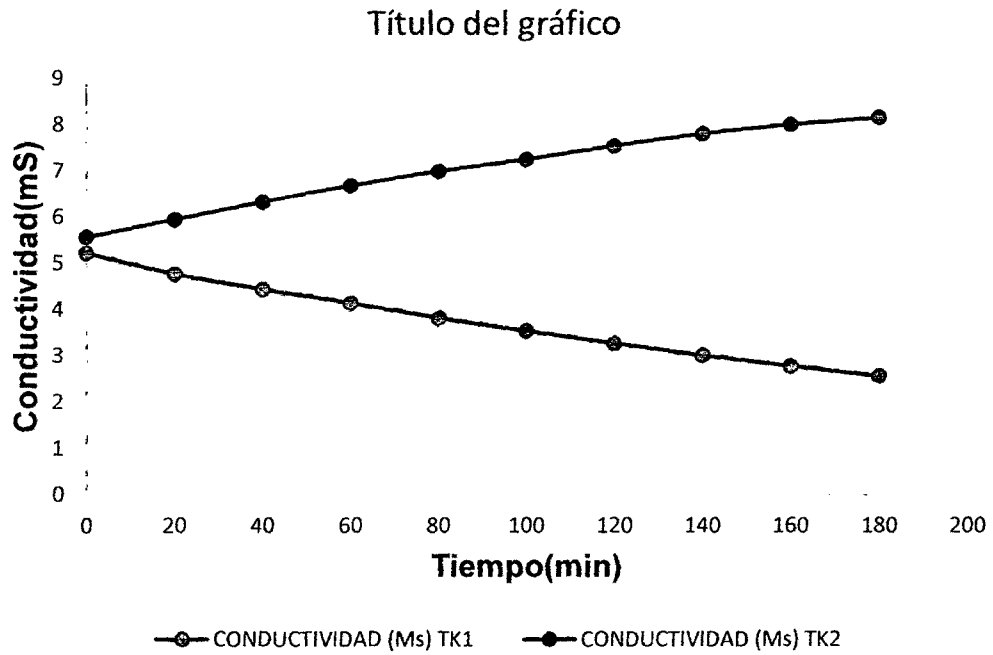
Concentración= 3g/L, flujo =500ml/min espaciador tipo A y 15 voltios

Tiempo(min)	Conductividad (mS)	
	Diluido	Concentrado
	Tk-1	Tk-2
0	5.21	5.56
20	4.76	5.94
40	4.43	6.32
60	4.13	6.67
80	3.81	6.98
100	3.53	7.24
120	3.26	7.53
140	3.00	7.79
160	2.77	7.99
180	2.55	8.14

Fuente: Elaboración Propia-2015



GRAFICA N° 6.11
CONDUCTIVIDAD DEL CONCENTRADO Y DILUIDO




Fuente: Elaboración Propia-2015

**TABLA N° 6.12:
CONDUCTIVIDAD – TIEMPO**

Concentración= 3g/L, flujo =200ml/min , tipo de espaciador B y voltaje 20

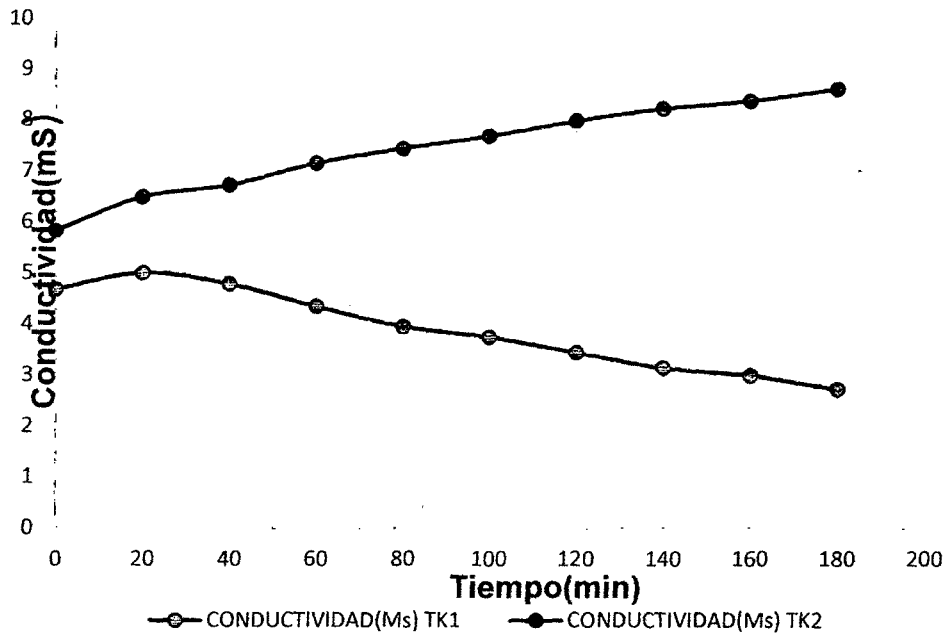
Tiempo(min)	Diluido	Concentrado
	Tk1	Tk2
0	5.67	5.82
20	4.99	6.48
40	4.77	6.71
60	4.33	7.14
80	3.94	7.43
100	3.73	7.67
120	3.43	7.97
140	3.13	8.21
160	2.98	8.36
180	2.71	8.59

Fuente: Elaboración Propia-2015



GRAFICA N° 6.12
CONDUCTIVIDAD DEL CONCENTRADO Y DILUIDO

Título del gráfico

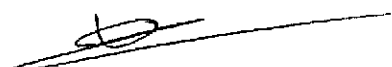


Fuente: Elaboración Propia-2015

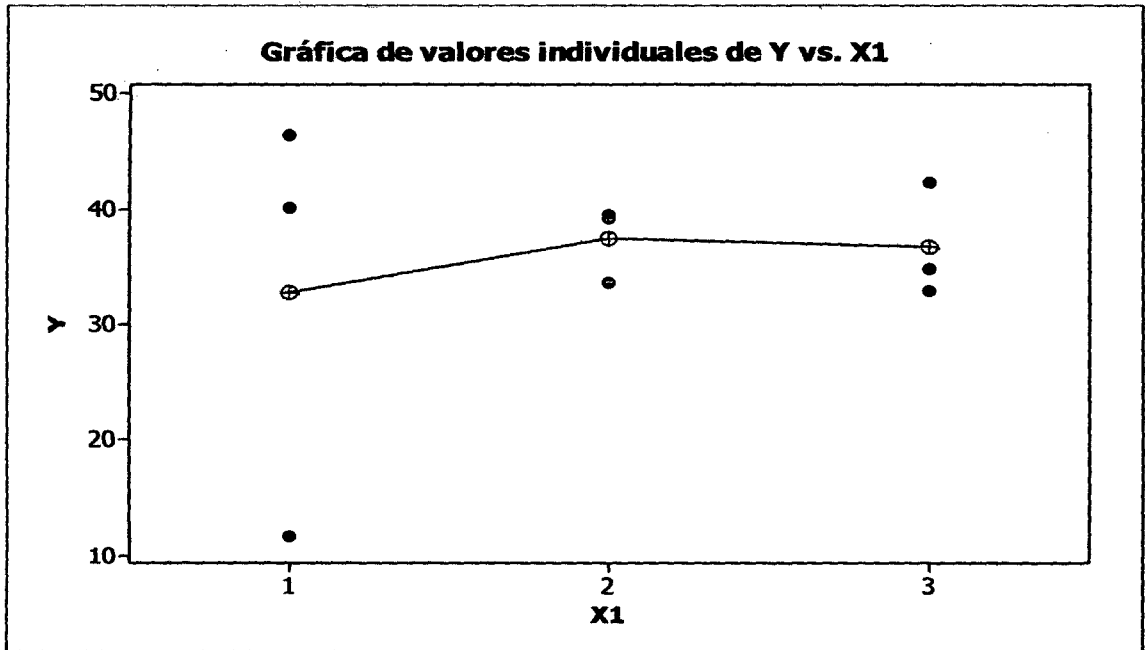
TABLA N° 6.13
PORCENTAJE DE SEPARACIÓN DE CLORURO DE SODIO

N°	X1	X2	X3	X4	Y(% de separación)
1	1	200	10	A	11,65%
2	1	300	15	B	46,46%
3	1	500	20	C	40,1%
4	2	200	15	C	39,5%
5	2	300	20	A	33,7%
6	2	500	10	B	39,3%
7	3	200	20	B	34,9%
8	3	300	10	C	42,4%
9	3	500	15	A	32,9%

Fuente: Elaboración Propia-2015

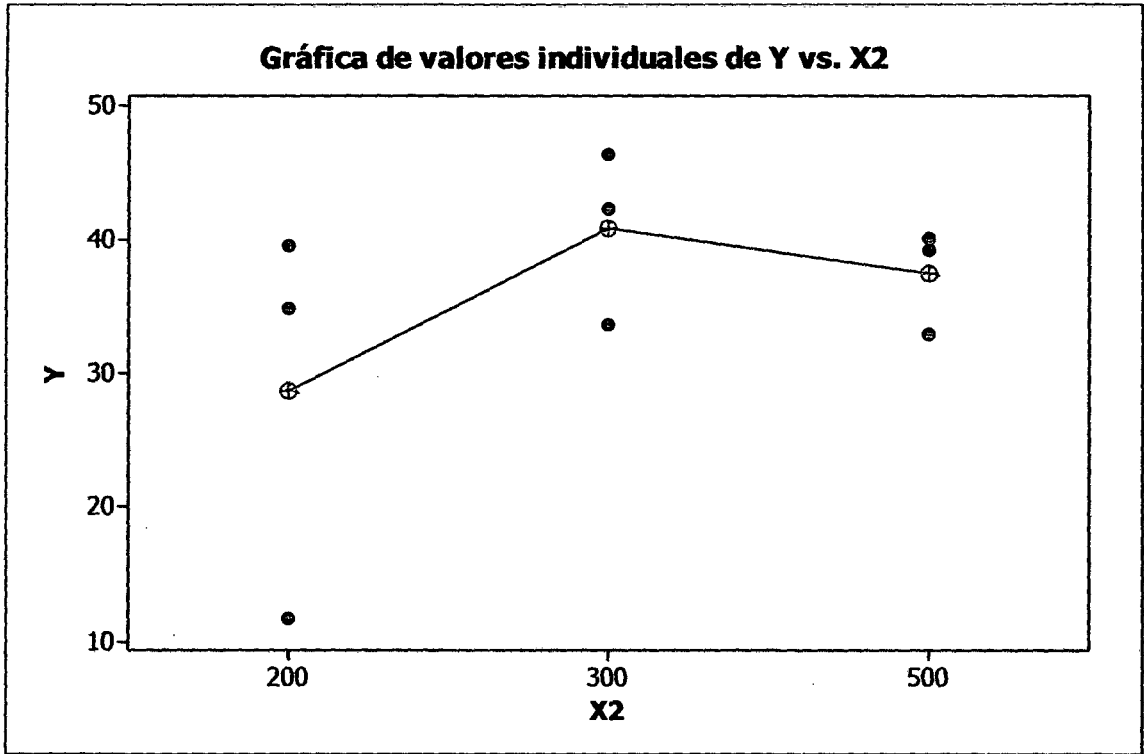


GRAFICA N° 6.13
PORCENTAJE DE SEPARACIÓN Vs X1



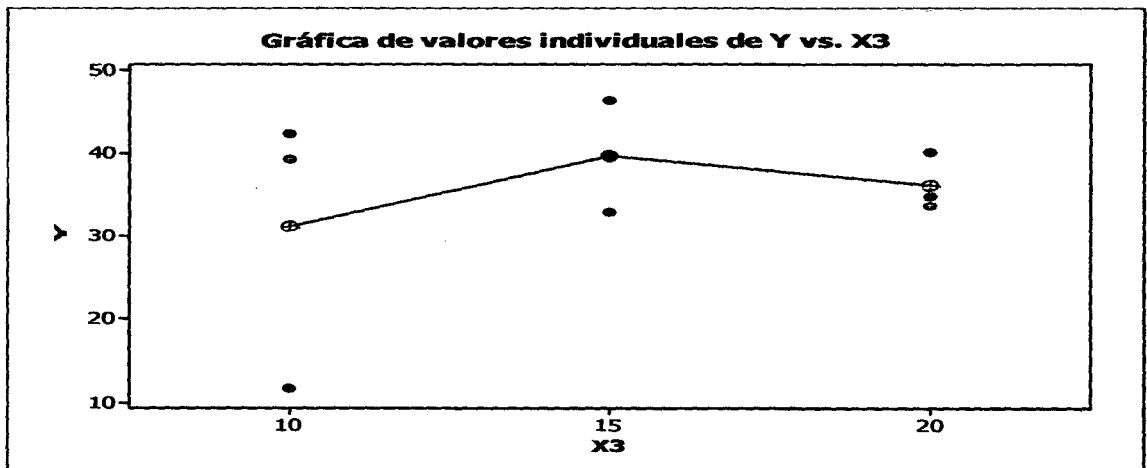
Fuente: Elaboración Propia-2015

GRAFICA N° 6.14
PORCENTAJE DE SEPARACIÓN Vs X2



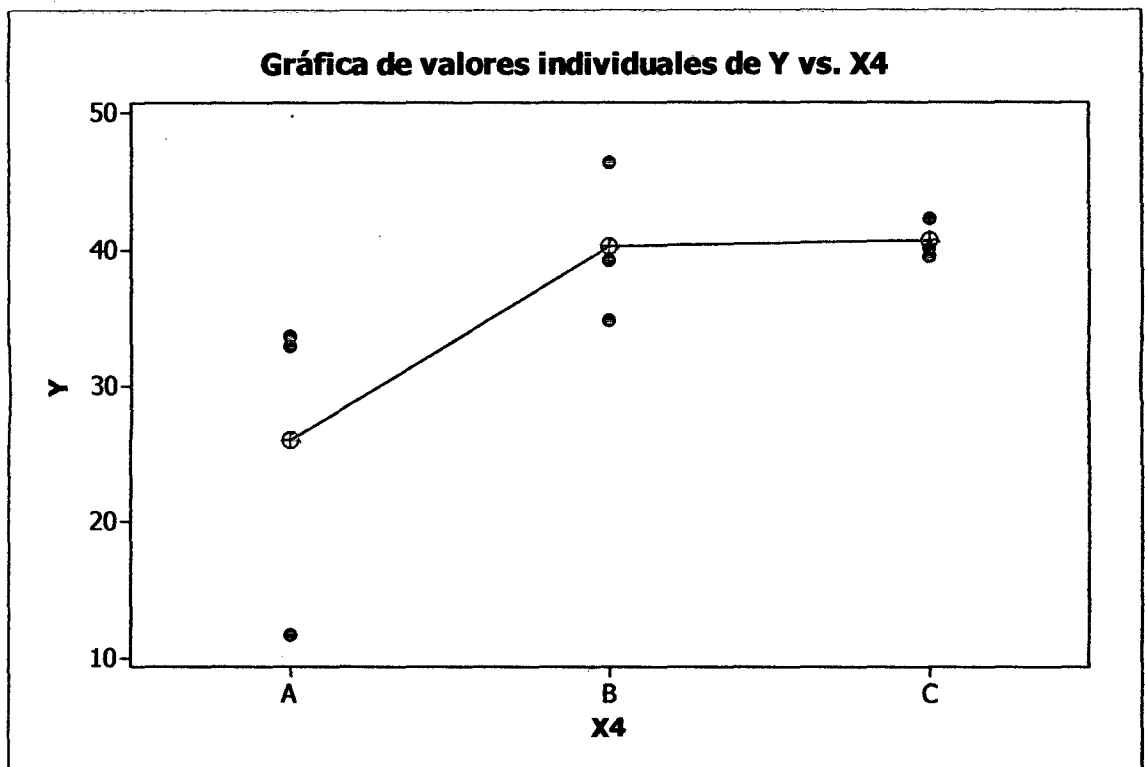
Fuente: Elaboración Propia-2015

GRAFICA N° 6.14
PORCENTAJE DE SEPARACIÓN Vs X3



Fuente: Elaboración Propia-2015

GRAFICA Nº 6.15
PORCENTAJE DE SEPARACIÓN Vs X4



Fuente: Elaboración Propia-2015

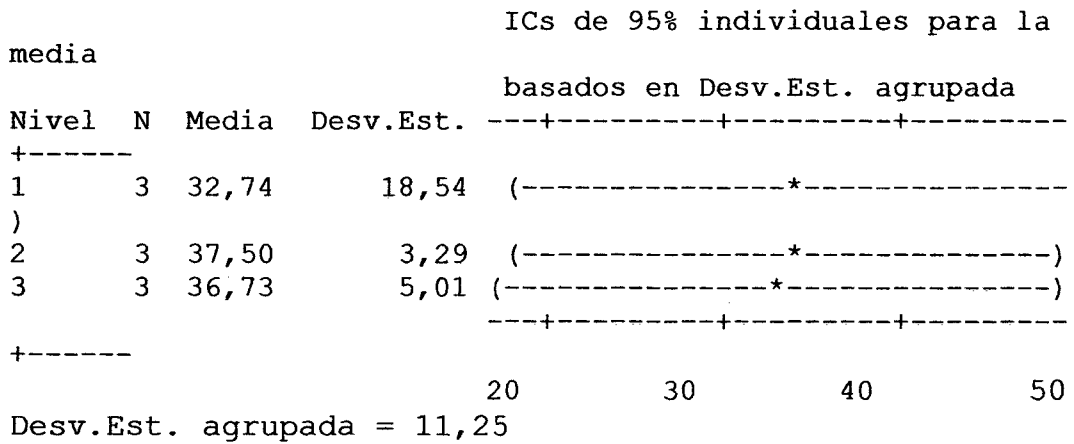
ANALISSI DE ANOVA AL DISEÑO TAGUCHI

Diseño Taguchi de arreglo ortogonal

L9(3**4) Factores: 4 Corridas: 9 Columnas de L9(3**4) Arreglo

ANOVA unidireccional: Y vs. X1

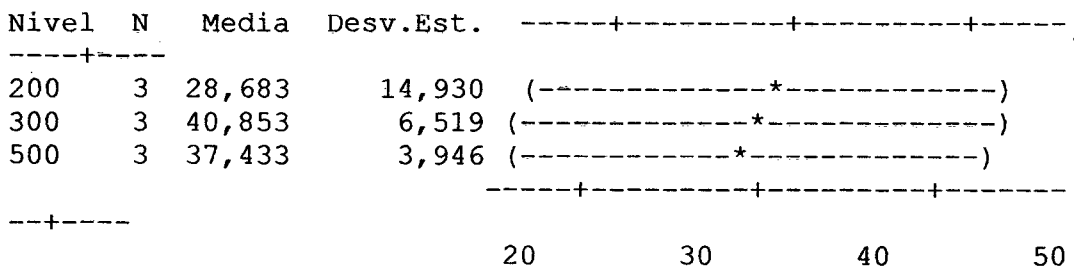
Fuente	GL	SC	MC	F	P
X1	2	39	20	0,16	0,860
Error	6	759	127		
Total	8	798			



ANOVA unidireccional: Y vs. X2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
X2	2	236,4	118,2	1,26	0,349
Error	6	561,9	93,7		
Total	8	798,3			

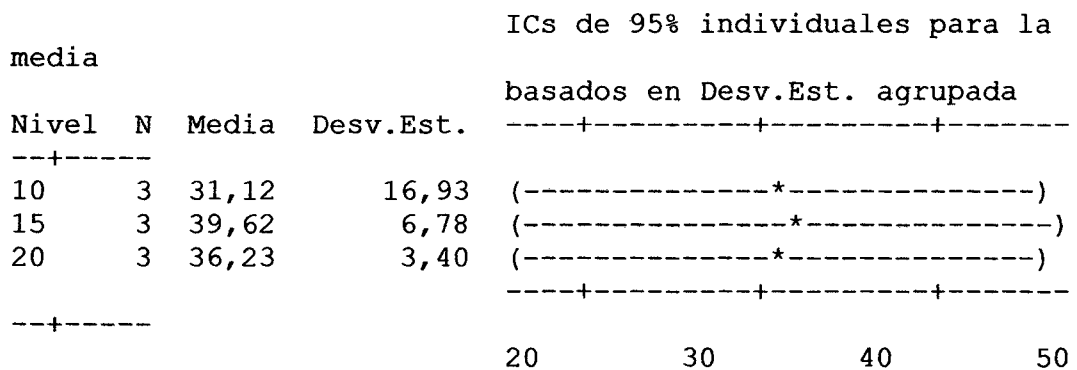
S = 9,678 R-cuad. = 29,61% R-cuad. (ajustado) = 6,15%



ANOVA unidireccional: Y vs. X3

Fuente	GL	SC	MC	F	P
X3	2	110	55	0,48	0,641
Error	6	688	115		
Total	8	798			

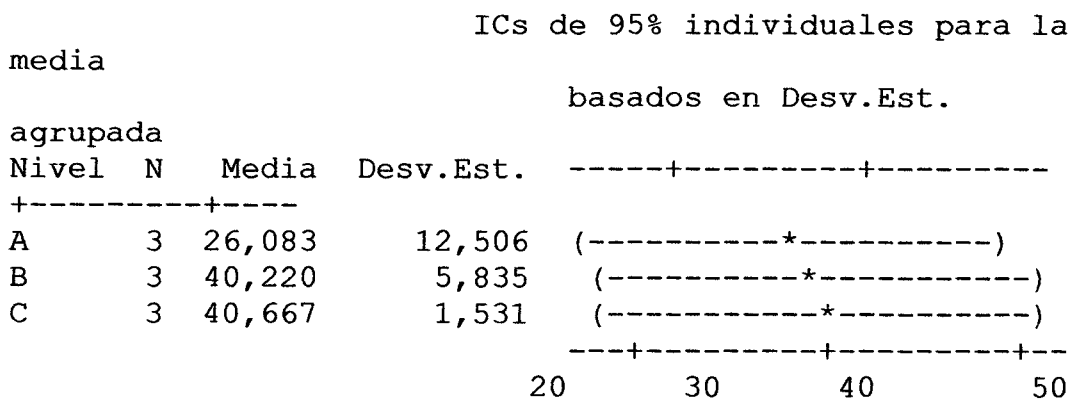
S = 10,71 R-cuad. = 13,77% R-cuad.(ajustado) = 0,00%



ANOVA unidireccional: Y vs. X4

Fuente	GL	SC	MC	F	P
X4	2	412,7	206,4	3,21	0,113
Error	6	385,6	64,3		
Total	8	798,3			

S = 8,016 R-cuad. = 51,70% R-cuad.(ajustado) = 35,60%



6.3. CALCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA

En base a los siguientes parámetros de operación y variables de diseño, se ha calculado el coeficiente de transferencia de masa del equipo de electrodiálisis utilizando tres espaciadores diferentes (A,B y C)

**TABLA N° 6.14:
PARÁMETROS EN EL CÁLCULO DE
COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA**

Parámetros	N° 1	N° 2	N° 3
Velocidad de flujo diluido (m ³ /s)	3,33x10 ⁻³	3,33x10 ⁻³	3,33x10 ⁻³
Concentración de entrada de diluido (mol/m ³)	51,28	51,28	51,28
Concentración de salida de diluido (mol/m ³)	18,88	32,73	33,9
Numero de pares de celda	2	2	2
Corriente Limite (A)	160mA	180 mA	140mA
Valencia de catión	1	1	1
Numero de faraday (C/eq)	96885	96885	96885
Tipo de espaciador	A	B	C
Coeficiente de difusión de NaCl e n agua	1,5x10 ⁻⁵ cm ² /s	1,5x10 ⁻⁵ cm ² /s	1,5x10 ⁻⁵ cm ² /s
Viscosidad cinemática del agua a 20°C	0,01 cm ² /s	0,01 cm ² /s	0,01 cm ² /s
Longitud	12cm	11 cm	10,5
Espesor del espaciador	2mm	2mm	3mm

Fuente: Elaboración Propia-2015



TABLA N° 6.15:
PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE COEFICIENTE DE
TRANSFERENCIA DE MASA

Parámetro	Ecuación	Valores
Calculo de flujo por un par de celda (diluido)	$q_d = \frac{Q_d}{n}$	$q_d = \frac{3,33 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{2}$ $= 1,66 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
Calculo de la velocidad lineal	$v = \frac{q_d}{A_{\text{canal}}}$	$v = \frac{1666 \text{ cm}^3/\text{s}}{2,4 \text{ cm}^2} = \frac{694,16 \text{ cm}}{\text{s}}$
Calculo del diámetro hidráulico	$d_h = 4 \frac{A_{\text{canal}}}{\text{perimetro}}$	$d_h = 4 \times \frac{2,4 \text{ cm}^2}{2(11 \text{ cm} + 0,2 \text{ cm})}$ $= 0,4285 \text{ cm}$
Calculo del número de Reynolds	$Re = \frac{v d_h}{\nu}$	$Re = \frac{\frac{694,16 \text{ cm}}{\text{s}} \cdot 0,4285 \text{ cm}}{0,01 \text{ cm}^2/\text{s}} = 29749,7$
Calculo del Numero de de Schmidt	$Sc = \frac{\nu}{D}$	$Sc = \frac{0,01 \text{ cm}^2/\text{s}}{1,5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}} = 666,7$
Calculo del Numero de Sherwood	$Sh = 1,85 \left(Re \cdot Sc \frac{d_h}{L} \right)$	$Sh = 1,85 \left(29749,71 \times 666,7 \frac{0,4285}{12} \right)^{0,33}$ $= 157,66$
Calculo de coeficiente de transferencia de masa	$Sh = \frac{k d_h}{D}$	$k = \frac{157,66 \times 1,5 \times 10^{-5}}{0,4285} = 5,519 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$

Fuente: Elaboración Propia-2015

TABLA N° 6.16
NÚMEROS ADIMENSIONALES Y COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA
DE MASA

N° EXPERIENCIA	1	2	3
Flujo	1 666 <i>cm</i> ³ / <i>s</i>	1 666 <i>cm</i> ³ / <i>s</i>	1 666 <i>cm</i> ³ / <i>s</i>
velocidad lineal	$\frac{694,16\text{cm}}{\text{s}}$	$\frac{757,27\text{cm}}{\text{s}}$	$\frac{528,8\text{cm}}{\text{s}}$
Diámetro hidráulico	0,4285 <i>cm</i>	0,3928 <i>cm</i>	0,583 <i>cm</i>
Numero de Reynolds	2 9749,7	2 9745,5	30 829,04
Numero de de Schmidt	666,7	666,7	666,7
Numero de Sherwood	146,9	157,65	184.54
Coeficiente de transferencia (Kc) de masa	$5,51 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$	$6,02 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$	$4,748 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$

Fuente: Elaboración Propia-2015

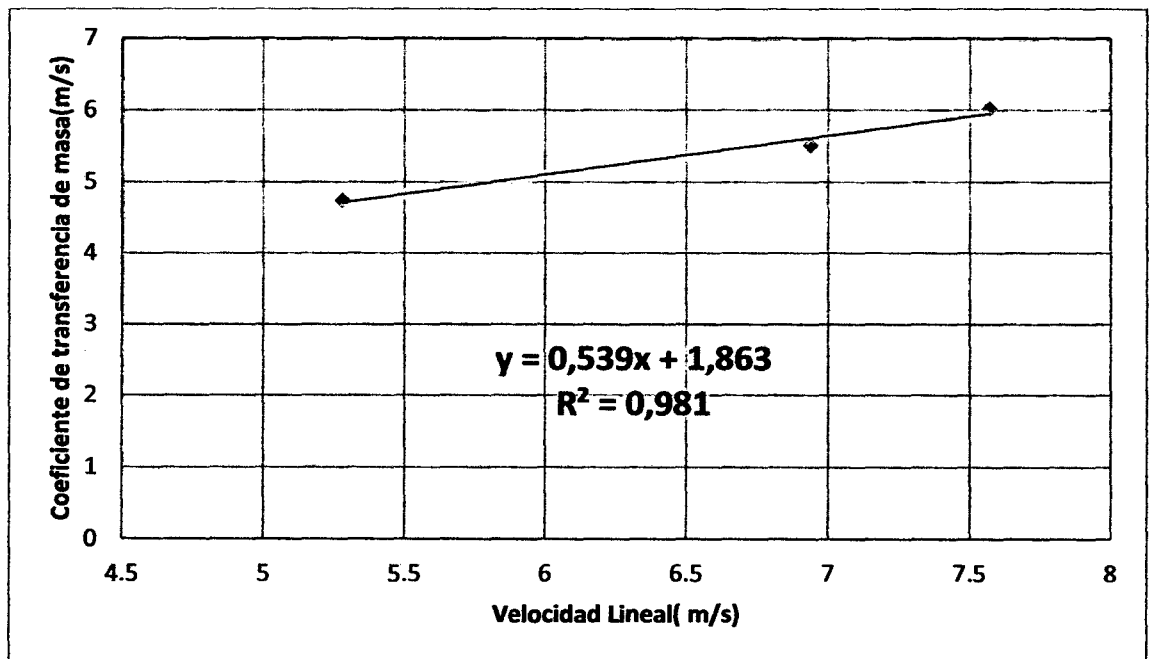


TABLA N° 6.17
COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA VS VELOCIDAD
LINEAL

N°	Velocidad Lineal	Tipo de espaciador	Coefficiente de Transferencia de Masa
<u>1</u>	$6,94 \frac{m}{s}$	A	$5,51 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$
<u>2</u>	$7,57 \frac{m}{s}$	B	$6,02 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$
<u>3</u>	$5,28 \frac{m}{s}$	C	$4,748 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$

Fuente: Elaboración Propia-2015

GRAFICO N° 6.17
COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA EN FUNCIÓN DE LA
VELOCIDAD LINEAL



Fuente: Elaboración Propia-2015

VII. DISCUSION DE RESULTADOS

7.1 Determinación de la Corriente Limite

Los resultados obtenidos de la corriente limite como se muestra en las gráficas N° 6.1, 6.2 y 6.3 son comparables de la corriente eléctrica limite que se presenta en el anexo 10.2, en donde se observa que no solo varia con la composición de la alimentación sino también con el flujo , tipo de espaciador .

De los resultados obtenidos, se observa que el módulo de electrodiálisis operando a la misma composición y flujo se puede señalar que operando con el espaciador tipo B, presenta mayor corriente límite.

7.2 Porcentaje de Separación en los Compartimientos

- De la tabla N° 5.13 se puede observar, la obtención (46,46%, 39,3% y 34,9,4%) cuando se ha experimentado con el espaciado tipo B alcanzado el mayor promedio con respecto a las otras experiencias.
- De la gráfica 5.14 se observa que trabajando el equipo a una concentración de 2g/L y 3 g/L no hay una variación significativa con respecto al porcentaje de separación,
- De la tabla N° 5.15 se observa que trabajando a 300 y 500 mL/min. se obtiene mayor porcentaje de separación
- De la gráfica 5.16 se observa que trabajando el equipo a una Tensión de 15 y 20 se alcanza mayor porcentaje de separación,
- De la gráfica 5.17 se observa que usando los espaciadores de tipo B y C no hay una variación significativa

- De acuerdo al análisis de ANOVA se observa que el valor de "P % está por encima de lo especificado en la hipótesis que es el valor de (0,05)

7.3 Coeficiente de Transferencia de Masa

De la tabla N° 5.17 se observa que cuando el equipo trabaja con el espaciador tipo B alcanza el mayor valor de coeficiente de transferencia de masa, también se observa que el coeficiente de transferencia de masa está influenciado directamente con la velocidad lineal de la corriente del compartimiento diluido, comparado con el anexo 10.2 se observa la misma tendencia de la gráfica.

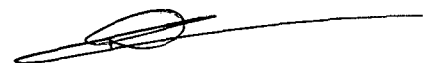


VIII. REFERENCIALES

1. A. Igual Muñoz, J. García Antón, J.L. Guiñón Segura y V. Pérez Herranz *Planta piloto de electrodiálisis Aplicaciones a la desalación de agua salobre* Dpto. de Ingeniería Química y Nuclear. Universidad Politécnica de Valencia
2. Hong-JooLee. HeinerStrathmann, Seung-HyeonMoon."Designing of anelectrodialysidesalinationplant". *Desalination*142(2002) 267
3. Laura J. Banasiak, Thomas W. Kruttschnitt. Andrea.Schafer."Desalinationusingelectrodialysisasafunctionofvoltag e andsaltconcentration".*Desalination*205(2007) 38-46.
4. J.M. Ortiz, E. Exposito, F. Gallud, V. Garcia- Garcia, V. Montiel, A. Aldaz. Photovoltaieelectrodialysis system for brackish water desalination: Modeling of global process.*Journal of membrane science* 274(2006) 138-149.
5. Juan Manuel Ortiz, Eduardo Expósito, Francisco Gallud, Vicente García-García, Vicente Montiel*, Antonio Aldaz, *Electrodialysis of brackish water powered by photovoltaic energy without batteries: direct connection behavior*, 208 (2007) 89–100
6. KhaledWalha , Raja Ben Amar, LoubnaFirdaous, Francis Quemeneur, pascal Jaouen. *Brackish groundwater treatment by nanofiltration, reverse osmosis and electrodialysis in Tunisia: performance and cost comparison*.*Desalination* 207(2007) 95-106.
7. L. M. Alvarez, A. Montes *Comparacion de dos membranas selectivas monopolares de intercambio aniónico en la remoción de nitratos*
8. Mariam Tureck*Optimizacionofelectrodialytic desalination in diluted solutions*.*Desalination* 153 (2002)383-387.

9. N. Kabay*, M. Demircioglu*, E. Ersiiz, I. Kurucaovali, Removal of calcium and magnesium hardness by electrodialysis, 149 (2002) 343-349.
10. O.V. Grigorchuc. V.I. Vasil-eva, V.A. Shaposhnik. Local characteristics of mass transfer under electrodialysis Demineralization. Desalinizacion 184 (2005) 431- 438
11. P.Mier, I Ortiz and R. Ibañez Mathematical description of Bipolar membranaelectrodialysis processes for obtention of acids and bases. Ingenieriaquimica 418, 166- 182.
12. R. Klischenko, B. Kornilovich, R. Chebotaryoba, V. Linkov Purification of galvanic sewage from metal by electrodialysis Desalination 126(1999) 159-162
13. R.Valerdi-Pérez, M. López-Rodríguez, J.A. Ibañez-Mengual*, Characterizing an electrodialysis reversal pilot plant, 137 (2001) 199–206.
14. R. Ibañez, P. Mier, M. J. Rivero e I. Ortiz Dpto. Ingeniería Química y Química Inorgánica Electrodiálisis con membranas bipolares
15. RamhValerdi-Perez, Jo& A. Ibtiez-Mengual*, Current-voltage curves for an electrodialysis reversal pilot plant: determination of limiting currents, 141 (2001) 23-37.
16. Stanislaw Koter Analysis of an electrodialysis unit on the basis of irreversible thermodynamics Desalination, 95(1994)139-153.
17. T Mohammadi A. Razmi, M. Sadrzadeh .Effect of operating parameters on Pb separation from wastewater using electrodialysis Desalination 167 (2004) 379-385
18. Toraj Mohammadi, Anita Kaviani, "Water Shortage and seawater desalination by electro dialysis", Desalination, Vol.158, 2003, 267-270.
19. Toraj Mohammadi, Anita Kaviani, Water shortage and sea water dealination by electrodialysis, 153 (2002) 399–404

20. Vu Hong Thang, Werner Koschuh, Klaus D. Kulbe, Stefan KromusCristianKrotscheek, SenadNovalin.Desalination of high sal content mixture by two- stage electro dialysis as the first step of separating valuable substances from grass silageDeslination 162 (2004) 343-353
21. V.V SlesarenkoElectro dialysis and reverse osmosis membrane plants at power stations .Desalination 158 (2003) 303-311
22. V.Niconenko, V.Zabolotsky, C.Larchet, B. Auclair, G. Pourcelly.Mathematycal Description of ion transport in membrane system. Desalination 147 (2002) 369-374.
23. V.Niconenko ,V.ZabolotskyA.G.Istoshin, M.Kh. Urtenov. C.Larchet., J. Benzaria.. Analysis of electro dialysis water desalination costs by convective-diffusion model..Desalination 126 (1999) 207-211..
24. V.E. Santadosa, F. Peretti, J. Zoppas, M. Zen.Study of ion seleectivemenbranes from electro dialysis removal of industrial effluent metals II: Zn and Ni.Desalination 149(2002) 389-391.
25. Yan Goug, Xiao-Lin, Wang, Li-xinYu.Proceso simulation of deslination by electro dialysis of an aqueous solution containing a neutral solute.Desalination172(2005)157-172.
26. *R. Ibáñez, P. Mier, M. J. Rivero e I. Ortiz* Dpto. Ingeniería Química y Química Inorgánica Electrodiálisis con membranas bipolares
27. William Shane Walker, B.S., M.S.E. Improving Recovery in Reverse Osmosis Desalination of Inland Brackish Groundwaters via Electro dialysis



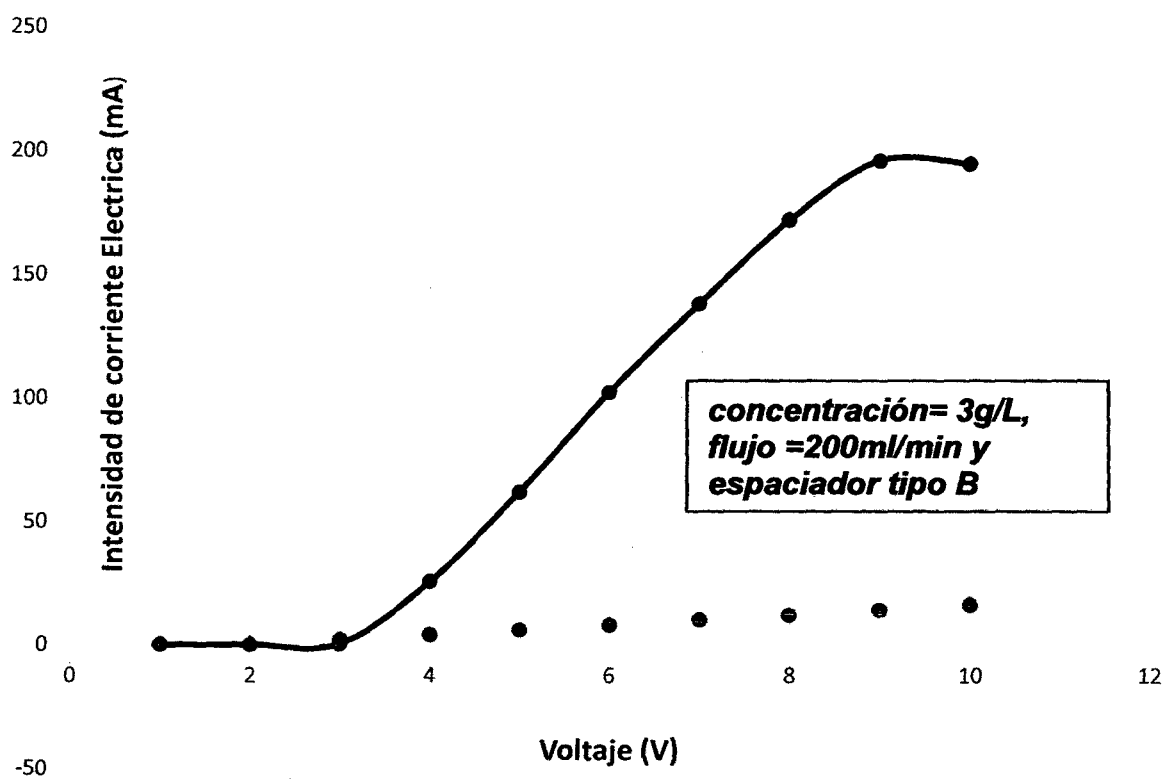
IX. APENDICE

- I. Relación Intensidad de Corriente – Voltaje para determinar corriente limite
- II. Porcentaje de Separación de Cloruro de Sodio
- III. Tabla de Coeficiente de Transferencia de Masa - Velocidad lineal
- IV. Gráfica del Coeficiente de Transferencia de Masa en Función de la Velocidad lineal



GRAFICA 9.1

RELACIÓN INTENSIDAD DE CORRIENTE - VOLTAJE



Fuente: Elaboración Propia-2015

TABLA N° 9.1
PORCENTAJE DE SEPARACIÓN DE CLORURO DE SODIO

N°	X1	X2	X3	X4	Y(% de separación)
1	1	200	10	A	11,65%
2	1	300	15	B	46,46%
3	1	500	20	C	40,1%
4	2	200	15	C	39,5%
5	2	300	20	A	33,7%
6	2	500	10	B	39,3%
7	3	200	20	B	34,9%
8	3	300	10	C	42,4%
9	3	500	15	A	32,9%

Fuente: Elaboración Propia-2015

TABLA N° 9.2

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA VS VELOCIDAD

LINEAL

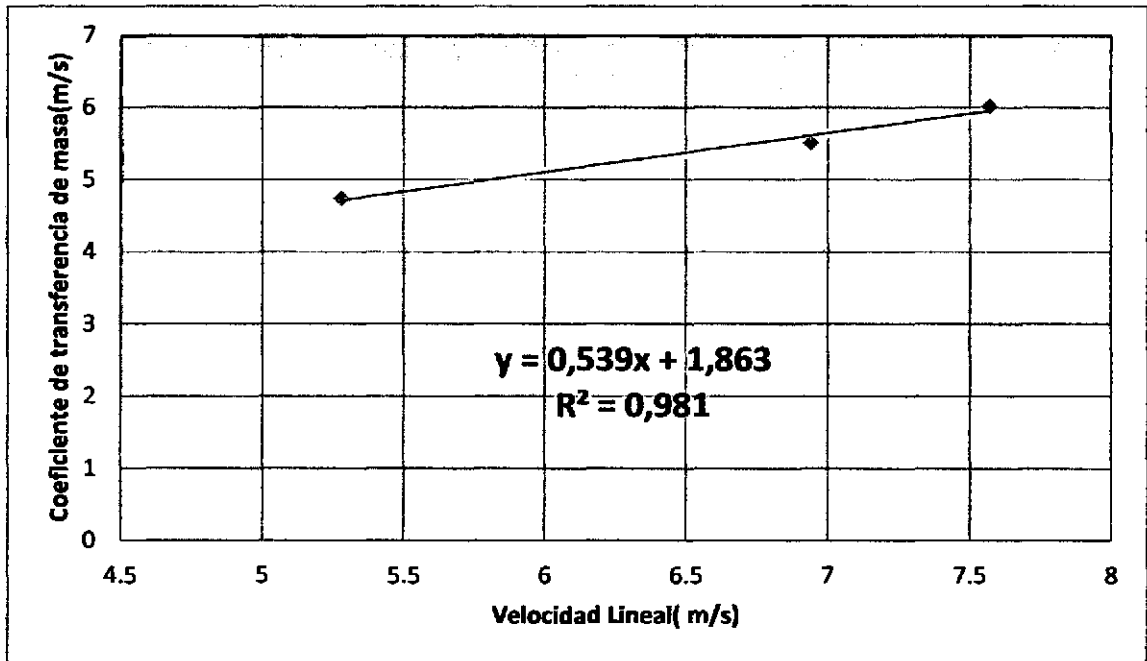
N°	Velocidad Lineal	Tipo de espaciador	Coefficiente de Transferencia de Masa
<u>1</u>	$6,94 \frac{m}{s}$	A	$5,51 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$
<u>2</u>	$7,57 \frac{m}{s}$	B	$6,02 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$
<u>3</u>	$5,28 \frac{m}{s}$	C	$4,748 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$

Fuente: Elaboración Propia-2015



GRAFICO N° 9.2

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD LINEAL



Fuente: Elaboración Propia-2015

X. ANEXOS

- I. MATRIZ DE CONSISTENCIA
- II. ESQUEMA DE ENSAMBRADO DEL MODULO DE ELECTRODIALISSI
- III. VARIACIÓN DE TRANSFERENCIA DE IONES A DIFERENTES INTENSIDADES DE CORRIENTE
- IV. CURVAS DE CALCULO DE CORRIENTE LIMITE
- V. CURVA DE CONCENTRADO Y DILUIDO EN FUNCION DEL TIEMPO



ANEXOS: MATRIZ DE CONSISTENCIA

TULO: "EVALUACION EXPERIMENTAL DE ESPACIADORES DE FLUJO EN LA TRANSFERENCIA DE MASA EN UN MODULO DE ELECTRODIALISSI

REVERSIBLE

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVOS	HIPÓTESIS.	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA
<p>Principal ¿Cuál será el espaciador de flujo mas adecuado en la transferencia de masa de un módulo de electrodiálisis reversible?</p> <p>Problemas Secundarios a) ¿Cuáles serán los parámetros de operación del módulo de electrodiálisis ? b) ¿Cuál será la concentración inicial de cloruro de sodio utilizada en la experimentación?</p>	<p>Objetivo General Evaluar experimentalmente espaciadores de flujo y efecto en la transferencia de masa en un modulo de electrodiálisis</p> <p>Objetivos Específicos a) Seleccionar tres tipos de espaciadores para su experimentación b) Seleccionar el tipo de agua a utilizar en la experimentación c) Determinar experimentalmente el coeficiente de transferencia de masa y la velocidad lineal</p>	<p>Hipótesis General Con los parámetros de operación entre los rangos de flujo(0,2 – 1mL/min) diferencia de potencial (5-30 voltios), tipo de espaciador (A,B y C tiempo (50- 120 min) concentración del electrolito (100-300 mg/L) obtendremos un mejor valor de coeficiente de transferencia de masa H₁: Es posible obtener nuevos diseños de espaciadores de flujo para obtener mayor transferencia de masa en un módulo de electrodiálisis</p>	<p>X = Variable Independiente parámetros de operación (x)</p> <p>Indicadores:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Concentración de alimentación de cloruro de sodio(x1) • Potencial (x2) • Flujo (x3) • Tipo de espaciador (x4) <p>Y=Variable porcentaje de separación del cloruro de sodio y coeficiente de transferencia de masa</p>	<p>Para el desarrollo Del trabajo de investigación se va construir tres espaciadores de flujo y efectuar las pruebas para ver su influencia en el porcentaje de separación y en el coeficiente de transferencia de masa</p>

FIGURA N° 10.1
ESQUEMA DE ENSAMBRADO DEL MODULO DE
ELECTRODIALISSI

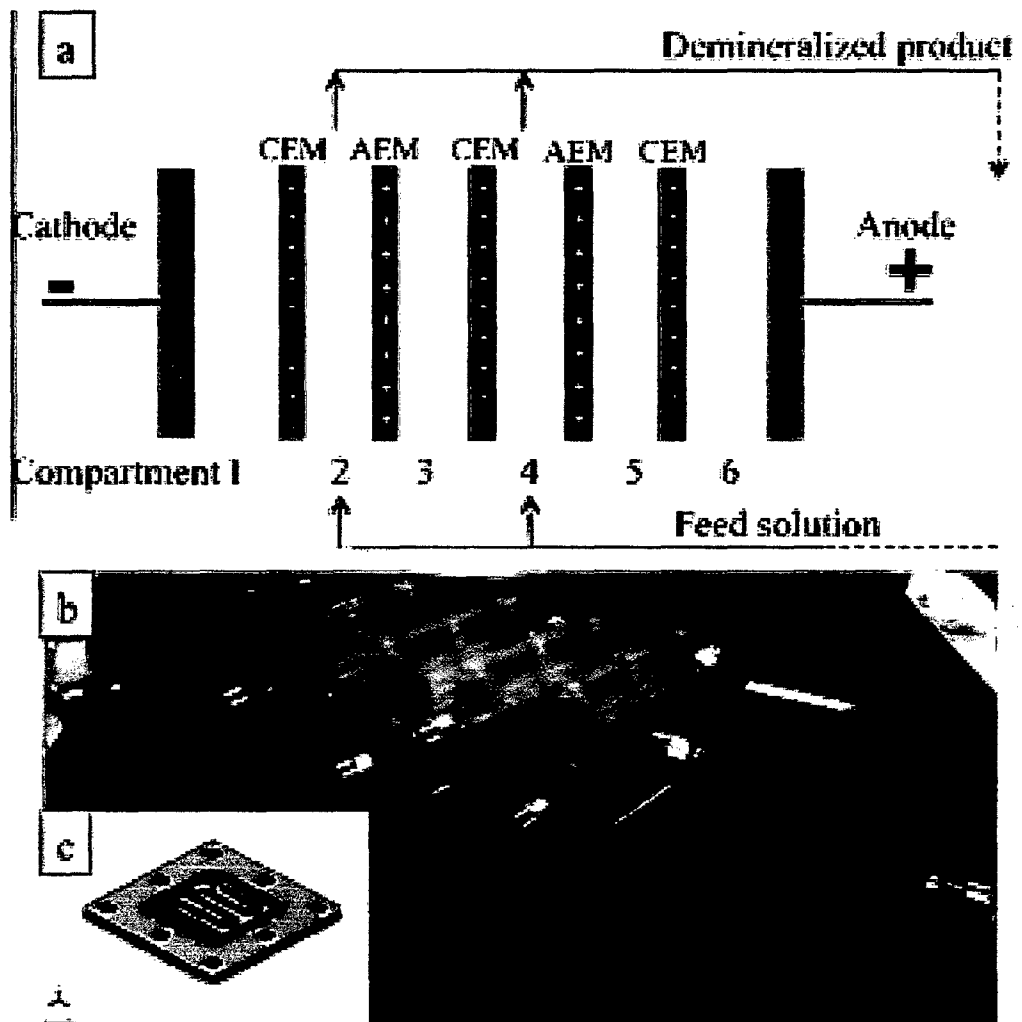


Fig. 1. (a) Schematic ED test cell configuration and (b) image of ED test cell set-up and (c) PMMA ED tortuous spacers design.

Fuente: Elaboración Propia-2015

GRAFICA N° 10.1

VARIACIÓN DE TRANSFERENCIA DE IONES A DIFERENTES INTENSIDADES DE CORRIENTE

L. Han et al. / Desalination 373 (2015) 38–46

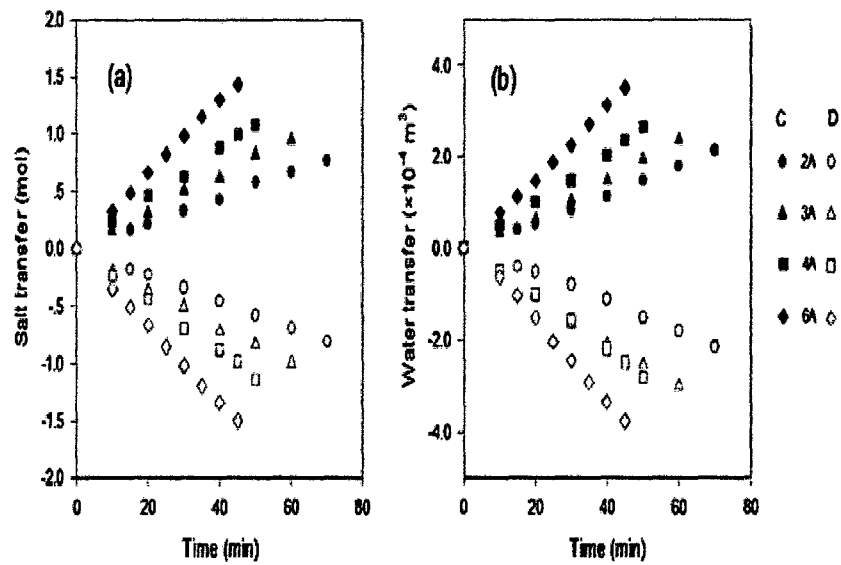


Fig. 2. Variation of the salt transfer (a) and water transfer (b) under different current intensities (2-6A) versus time, e.g. solution S1 (C for concentrate, D for diluate).

Fuente: Elaboración Propia-2015

FIGURA N°10.2

CALCULO DE CORRIENTE LIMITE

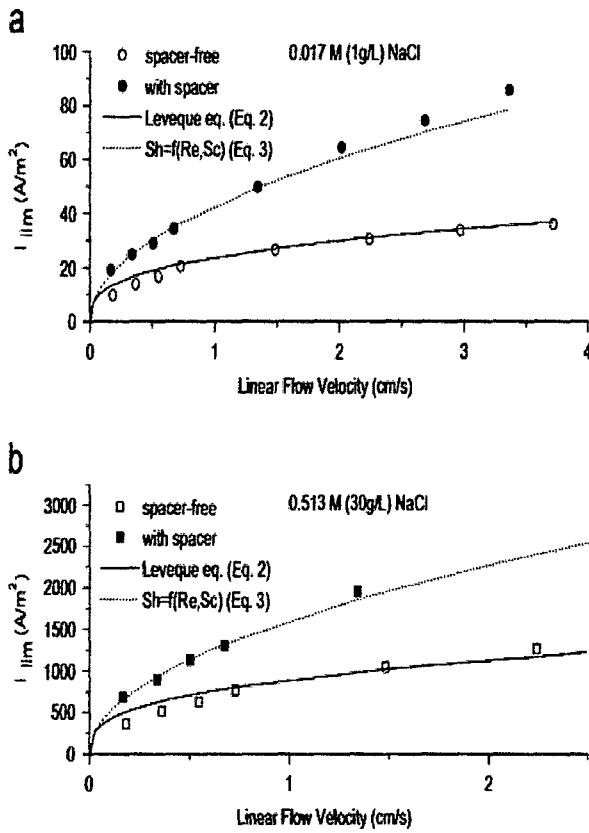


Fig. A1. Limiting current density results obtained by linear sweep voltammetry, over the central cation-exchange membrane in a two-cell pair RED stack configuration, with a) 1 g/L NaCl solution and b) 30 g/L NaCl solution. The adjustment of Leveque's equation and a Sherwood correlation is shown for a spacer-free stack and a stack with spacers, respectively.

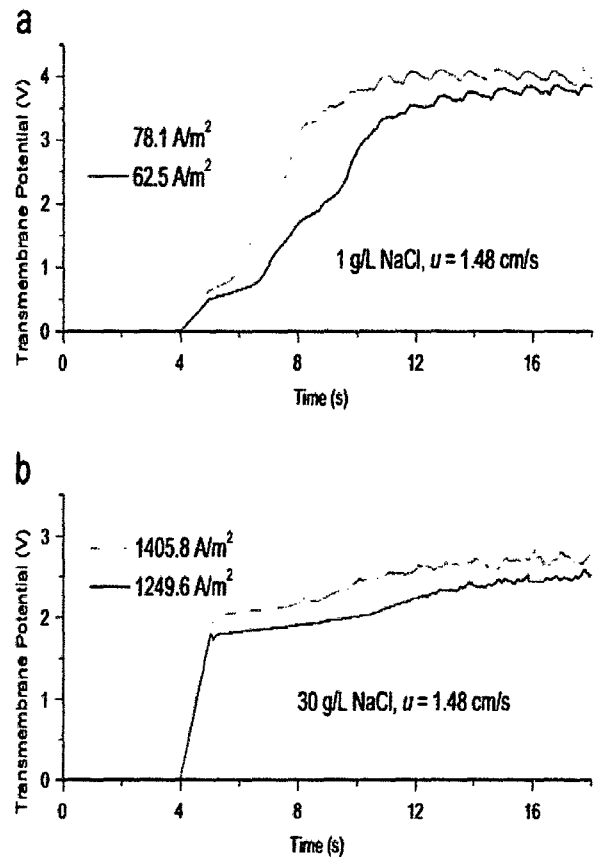


Fig. B1. Chronopotentiograms obtained in the over-limiting current density regime, over the central cation-exchange membrane in a two-cell pair, spacer-free RED stack, with a) 1 g/L NaCl solution and b) 30 g/L NaCl solution.

GRAFICA N° 10.3

CURVA DE CONCENTRADO Y DILUIDO EN FUNCION DEL
TIEMPO

