

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“OBTENCIÓN DE ÁCIDO CLORHÍDRICO E
HIDRÓXIDO DE SODIO A PARTIR DE AGUA DE
REGENERACIÓN DE RESINAS DE INTERCAMBIO
IÓNICO MEDIANTE ELECTRODIÁLISIS”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO QUÍMICO

KAREN LIZBETH, PONCE PONCE

LIZBETH GINA, PRIETO FERNÁNDEZ

Callao, Mayo, 2018

PERÚ

**LIBRO 2 FOLIO No. 115 ACTA N° 298 DE SUSTENTACION DE TESIS SIN
CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO**

El día Veinte de Setiembre del Dos Mil Dieciocho, siendo las14.00..... horas, se reunió el JURADO DE SUSTENTACION DE TESIS de la Facultad de Ingeniería Química, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

Ing. CALDERON CRUZ JULIO CESAR	: Presidente
Ing. GUTIERREZ CUBA CESAR	: Secretario
Ing. HERRERA SANCHEZ SONIA ELIZABETH	: Vocal
Ing. MEDINA COLLANA JUAN TAUMATURGO	: Asesor

Con el fin de dar inicio al acto de sustentación de tesis de las Bachilleres PONCE PONCE KAREN LIZBETH Y PRIETO FERNANDEZ LIZBETH GINA, quienes habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico, sustentan la tesis titulada "OBTENCIÓN DE ÁCIDO CLORHÍDRICO E HIDRÓXIDO DE SODIO A PARTIR DE AGUA DE REGENERACIÓN DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO MEDIANTE ELECTRODIÁLISIS".

Con el quórum reglamentario de ley, se dio inicio a la sustentación de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado y efectuadas las deliberaciones pertinentes, se acordó: Dar por aprobada con el calificativo bueno a las sustentantes Bachilleres PONCE PONCE KAREN LIZBETH Y PRIETO FERNANDEZ LIZBETH GINA.

Se dio por cerrada la Sesión a las 15.10 horas del día veinte del mes y año en curso.


Ing. CALDERON CRUZ JULIO CESAR
Presidente


Ing. GUTIERREZ CUBA CESAR
Secretario


Ing. HERRERA SANCHEZ SONIA ELIZABETH
Vocal


Ing. MEDINA COLLANA JUAN TAUMATURGO
Asesor

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA**

Recomendaciones de los Señores Miembros del Jurado de Sustentación a los Sustentantes, para que realicen las correcciones de la tesis antes de su aprobación.

TESISTAS : Bachilleres PONCE PONCE KAREN LIZBETH Y PRIETO FERNANDEZ LIZBETH GINA.

: "OBTENCIÓN DE ÁCIDO CLORHÍDRICO E HIDRÓXIDO DE SODIO A PARTIR DE AGUA DE REGENERACIÓN DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO MEDIANTE ELECTRODIÁLISIS".

I. PRESIDENTE

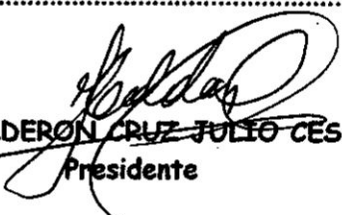
.....
.....
.....

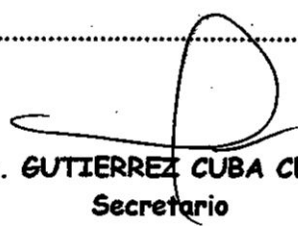
II. SECRETARIO

.....
.....
.....

III. VOCAL

.....
.....
.....


Ing. CALDERON CRUZ JULIO CESAR
Presidente


Ing. GUTIERREZ CUBA CESAR
Secretario


Ing. HERRERA SANCHEZ SONIA ELIZABETH
Vocal

Bellavista, 20 de setiembre 2018

Pily c.

DEDICATORIA

Esta tesis es dedicada a Dios por
la fortaleza que nos dio para
culminar esta investigación, a
nuestros padres por su amor
incondicional, su paciencia y
sabiduría inculcada en cada
paso que damos en la vida.

ÍNDICE

I.	PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	11
1.1.	Identificación del problema	11
1.2.	Formulación del problema	12
1.2.1.	Problema general	12
1.2.2.	Problemas específicos	12
1.3.	Objetivos de la investigación	13
1.3.1.	Objetivo general	13
1.3.2.	Objetivos específicos	13
1.4.	Justificación	14
1.4.1.	Justificación legal	14
1.4.2.	Justificación tecnológica	14
1.4.3.	Justificación económica	14
1.4.4.	Justificación ambiental	14
1.5.	Importancia	15
II.	MARCO TEÓRICO.....	16
2.1.	Antecedentes de la investigación	16
2.2.	Marco conceptual	18
2.2.1.	Ácido clorhídrico	18
2.2.2.	Hidróxido de sodio.....	18
2.2.3.	Parámetros característicos del agua	19
2.2.4.	Intercambio iónico	21
2.2.5.	Resinas de intercambio iónico	23
2.2.6.	Reacción de intercambio iónico.....	23
2.2.7.	Regeneración de la resina.....	25
2.2.8.	Agua de regeneración de resina de intercambio iónico.....	26
2.2.9.	Precipitación química de dureza y sulfatos	27
2.2.10.	Electrodialisis	28
2.2.11.	Procesos de obtención de ácido y base.....	34
2.2.12.	Diseño de experimentos	40
2.3.	Definición de términos.....	44
2.3.1.	SWD-RO. Ósmosis inversa de desalinización de agua de mar	44
2.3.2.	ED: Electrodialisis	44
2.3.3.	EDMB: Electrodialisis con membrana bipolar.....	44
2.3.4.	GPM: Galones por minuto.....	44
III.	VARIABLES E HIPÓTESIS.....	45
3.1.	Variables de investigación	45

3.2.	Operacionalización de variables.....	47
3.3.	Hipótesis.....	49
3.3.1.	Hipótesis general.....	49
3.3.2.	Hipótesis específica	49
IV.	METODOLOGÍA.....	50
4.1.	Tipo de investigación	50
4.1.1.	Por su finalidad.....	50
4.1.2.	Por su diseño interpretativo	50
4.1.3.	Por el énfasis en la naturaleza de los datos manejados	50
4.2.	Diseño de investigación.....	50
4.3.	Población y muestra	52
4.3.1.	Población.....	52
4.3.2.	Muestra.....	52
4.4.	Técnicas e instrumentos para la recolección de datos	53
4.4.1.	Técnicas a utilizar	53
4.4.2.	Equipos, materiales y reactivos.	54
4.5.	Procedimiento de recolección de datos.....	60
4.5.1.	Etapa inicial de investigación.....	60
4.5.2.	Etapa final de Investigación	68
4.6.	Procedimiento estadístico y análisis de datos.....	76
4.6.1.	Estrategia de análisis estadístico.....	78
4.6.2.	Plan de Interrelación de Variables	79
V.	RESULTADOS.....	81
5.1.	Resultados de análisis de dureza, cloruros y sulfatos	81
5.2.	Resultados de la precipitación química.....	85
5.3.	Resultados de conductividad, pH y concentración de los 8 experimentos durante la obtención de HCl e NaOH.....	92
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	129
6.1.	Contrastación de Hipótesis con los resultados.....	129
6.1.	Contrastación de resultados con otros estudios anteriores.....	133
VII.	CONCLUSIONES.....	134
IX.	RECOMENDACIONES	135
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	136
ANEXOS.....	141	

Lista de figuras

Figura N° 2.1 :Ablandador de agua(LOPU,UNAC).....	22
Figura N° 2.2 Representación de los sitios activos de una membrana	24
Figura N° 2.3 Proceso de difusión de la resina.....	25
Figura N° 2.4 Proceso de electrodiálisis	28
Figura N° 2.5 Esquema de un módulo de electrodiálisis de celdas de dos compartimentos.....	30
Figura N° 2.6 Tipos de Espaciadores	33
Figura N° 2.7 Esquema de un módulo de electrodiálisis.....	34
Figura N° 2.8 Esquema típico de funcionamiento para la EDMB en la producción de ácidos y bases.....	35
Figura N° 2.9 Diagrama de flujo de Producción de Cloro-Soda	37
Figura N°2.10 Síntesis de ácido clorhídrico	39
Figura N°2.11 Diagrama de diseño experimental.....	40
Figura N°2.12 Variables experimentales para HCl	43
Figura N° 2.13 Variables experimentales para el NaOH.....	43
Figura N°3.1 Relación de variables para el HCl	45
Figura N° 3.2 Relación de variables de NaOH	46
Figura N°4.1 Diseño de la Investigación	51
Figura N° 4.2 Materiales de vidrio	56
Figura N°4.3 Turbidímetro	56
Figura N°4.4 Balanza electronica	57
Figura N° 4.5 Conductímetro ADWA AD 330	57
Figura N°4.6 PH metro ADWA	58
FiguraN°4.7 Fuente de Poder	58
Figura N°4.8 Test de Jarras B-KER	59
Figura N°4.9 Agitador Magnetico MODEL 85	59
Figura N°4.10 Pesaje de reactivos utilizados en el test de jarras	60
Figura N°4.11 Precipitación de Ca^{+2} , Mg^{+2} o SO_4^{-2} en el test de jarras	61
Figura N°4.12 Determinación de dureza	61
Figura N°4.13 Muestras con = 0 ppm	62
Figura N° 4.14 Análisis de Sulfatos	62
Figura N°4.15 Análisis de Cloruros	63
Figura N°4.16 Precipitación de agua de regeneración de resinas de intercambio iónico	64
Figura N° 4.17 Análisis de Alcalinidad con fenolftaleína	65
Figura N°4.18 Alcalinidad con rojo de metilo	65
Figura N°4.19 Diagrama de flujo de la precipitación química de agua de regeneración de resina	66

Figura N°4.20 Diagrama de procesos del tratamiento de agua de regeneración de resinas de intercambio iónico	67
Figura N°4.21 Esquema de la configuración de la celda de electrodiálisis	68
Figura N°4.22 Equipo de electrodiálisis	69
Figura N° 4.23 Vista lateral del equipo de electrodiálisis	69
Figura N° 4.24 Equipo de electrodiálisis en marcha	70
Figura N° 4.25 Titulación del ácido con fenoltaleína	71
Figura N°4.26 Titulación del hidróxido de sodio con fenoltaleína	72
Figura N°4.27 Análisis de Cloruro de sodio	72
Figura N°4.28 Diagrama de flujo de la obtención de ácido y base	74
Figura N°4.29 Diagrama de proceso para la obtención de ácido y base	75
Figura B1: Concentración de sal, ácido y base en el tiempo experimental inicial y final bajo diferentes concentraciones iniciales de NaCl.	144
Figura B2: Concentración de sal, ácido y base en el tiempo experimental inicial y final bajo diferentes concentraciones iniciales de HCl y NaOH (0.05, 0.10 y 0.50 M). Usando NaCl nominal inicial concentración de a) 100 g / L y b) 200 g / L.	145

Lista de tablas

Tabla N°2.1	Matriz de experiencias	42
Tabla N°2.2	Variables experimentales	42
Tabla N°3.1	Ácido clorhídrico	47
Tabla N°3.2	Hidróxido de Sodio	48
Tabla N°4.1	Variables y niveles de investigación	76
Tabla N°4.2	Caracterización de los 3 niveles de experimentación	77
Tabla N°4.3	Configuración de las pruebas para la experimental del HCl e NaOH	78
Tabla N°5.1	(g/L) Na ₂ CO ₃ vs Dureza y Cloruros de la primera muestra	81
Tabla N°5.2	(g/L) NaOH vs Dureza y Cloruros de la primera muestra	81
Tabla N°5.3	(g /L) BaCl ₂ vs Dureza y Cloruros de la primera muestra	82
Tabla N°5.4	(g/L) Na ₂ CO ₃ vs Dureza y Cloruros de la segunda muestra	82
Tabla N°5.5	(g/L) NaOH vs Dureza y Cloruros de la segunda muestra	83
Tabla N°5.6	(g /L) BaCl ₂ vs Dureza y Cloruros de la segunda muestra	83
Tabla N°5.7	(g /L) BaCl ₂ vs Dureza y Cloruros de la segunda muestra	84
Tabla N°5.8	Resultados del análisis del agua de regeneración de resinas	85
Tabla N°5.9	Óptimos para precipitar el agua de regeneración de resinas de intercambio iónico	85
Tabla N°5.10	Resultados después de la precipitación química	91
Tabla N°5.11	Análisis de alcalinidad después de la precipitación química	91
Tabla N°5.12	Resultados de concentración, conductividad y pH de HCl, NaOH y NaCl del experimento N°1	92
Tabla N°5.13	Resultados de concentración, conductividad y pH de HCl, NaOH y NaCl del experimento N°2.....	95
Tabla N°5.14	Resultados de concentración, conductividad y pH de HCl, NaOH y NaCl del experimento N°3.....	98
Tabla N°5.15	Resultados de concentración, conductividad y pH de HCl, NaOH y NaCl del experimento N°4.....	101
Tabla N°5.16	Resultados de concentración, conductividad y pH de HCl, NaOH y NaCl del experimento N°5.....	104
Tabla N°5.17	Resultados de concentración, conductividad y pH de HCl, NaOH y NaCl del experimento N°6.....	107
Tabla N°5.18	Resultados de concentración, conductividad y pH de HCl, NaOH y NaCl del experimento N°7	110
Tabla N°5.19	Resultados de concentración, conductividad y pH de HCl, NaOH y NaCl del experimento N°8	113
Tabla N°5.20	Resultados de % de desalación, Kwh/Kg NaCl	116
Tabla N°5.21	Concentraciones obtenidas de HCl	118

Tabla N°5.22	Concentraciones obtenidas de NaOH.....	123
Tabla N°6.1	Resultados obtenidos según artículo: Producción de ácido fuerte y base	133
Tabla N°6.2	Resultados obtenidos durante la investigación	133
Tabla A1	Matriz de consistencia de la Obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de agua de regeneración de resinas de intercambio iónico.....	142

Lista de Gráficos

Gráfico N°5.1	Tiempo vs Conductividad de HCl e NaOH del experimento N°1 ..	93
Gráfico N°5.2	Tiempo vs pH de HCl e NaOH del experimento N°1	93
Gráfico N°5.3	Tiempo vs Concentración de HCl e NaOH del experimento N°1 ..	94
Gráfico N°5.4	Tiempo vs Conductividad de HCl e NaOH del experimento N°2 ..	96
Gráfico N°5.5	Tiempo vs pH de HCl e NaOH del experimento N°2.....	96
Gráfico N°5.6	Tiempo vs Concentración de HCl e NaOH del experimento N°2 ..	97
Gráfico N°5.7	Tiempo vs Conductividad de HCl e NaOH del experimento N°3 ...	99
Gráfico N°5.8	Tiempo vs pH de HCl e NaOH del experimento N°3	99
Gráfico N°5.9	Tiempo vs Concentración de HCl e NaOH del experimento N°3	100
Gráfico N°5.10	Tiempo vs Conductividad de HCl e NaOH del experimento N°4	102
Gráfico N°5.11	Tiempo vs pH del experimento N°4	102
Gráfico N°5.12	Tiempo vs Concentración de HCl e NaOH del experimento N°4	103
Gráfico N°5.13	Tiempo vs Conductividad de HCl e NaOH del experimento N°5	105
Gráfico N°5.14	Tiempo vs pH de HCl e NaOH del experimento N°5	105
Gráfico N°5.15	Tiempo vs Concentración de HCl e NaOH del experimento N°5	106
Gráfico N°5.16	Tiempo vs Conductividad de HCl e NaOH del experimento N°6	108
Gráfico N° 5.17	Tiempo vs del pH de HCl e NaOH del experimento N°6	108
Gráfico N°5.18	Tiempo vs Concentración de HCl e NaOH del experimento N°6	109
Gráfico N°5.19	Tiempo vs Conductividad de HCl e NaOH del experimento N°7	111
Gráfico N°5.20	Tiempo vs del pH de HCl e NaOH del experimento N°7	111
Gráfico N°5.21	Tiempo vs Concentración de HCl e NaOH del experimento N°7	112
Gráfico N°5.22	Tiempo vs Conductividad de HCl e NaOH del experimento N°8	114
Gráfico N°5.23	Tiempo vs pH de HCl e del experimento N°8	114_Toc498350966
Gráfico N°5.24	Tiempo vs Concentración de HCl e NaOH del experimento N°8	115
Gráfico N°5.25	N° experimentos vs % desalación	117
Gráfico N°5.26	N° experimentos vs kWh/kgNaCl	117
Gráfico N°5.27	Gráfica del efecto normal de HCl	119
Gráfico N°5.28	Gráfica de Pareto de HCl	119
Gráfico N°5.29	Gráfica de superficie de Concentración de HCl vs Caudal, Concentración de NaCl	120
Gráfico N°5.30	Concentración de HCl vs Caudal, Voltaje	121
Gráfico N°5.31	Gráfica de superficie de Concentración de HCl vs, Concentración de NaCl, Voltaje.	121
Gráfico N°5.32	Gráfica contorno de Concentración de HCl vs, Caudal, Concentración de NaCl.	122
Gráfico N°5.33	Gráfica contorno de Concentración de HCl vs, Caudal, Voltaje ..	122

Gráfico N°5.34 Gráfica contorno de Concentración de HCl vs Concentración de NaCl, Voltaje	123
Gráfico N°5.35 Gráfica de los efectos normales de NaOH	124
Gráfico N°5.36 Gráfica de Pareto de NaOH.....	124
GráficoN°5.37 Gráfica de superficie de la concentración de NaOH vs Caudal, Concentración de NaCl.....	125
GráficoN°5.38 Gráfica de superficie de la concentración de NaOH vs Caudal, Voltaje	126
Gráfico N°5.39 Gráfica de superficie de la concentración de NaOH vs Concentración de NaCl, Concentración de NaCl.....	126
GráficoN°5.41 Grafica de superficie de la concentración de NaOH vs Caudal, Voltaje	127
GráficoN°5.40 Grafica de contorno de la concentración de NaOH vsCaudal, Concentración de NaCl.....	127
Gráfico N°5.42 Grafica de superficie de la concentración de NaOH vs Concentración de NaCl, Voltaje	128
Gráfico N°6.1 Gráfica de distribución de la concentración de HCL	129
Gráfico N 6.2 Gráfica de distribución de la concentración de NaOH	131

RESUMEN

La presente investigación permitió la obtención de ácido clorhídrico e hidróxido de sodio a partir del agua residual de regeneración de resinas de intercambio iónico mediante la tecnología de electrodiálisis.

Durante la etapa inicial de la investigación se realizó un pre-tratamiento al agua residual de regeneración de resinas de intercambio iónico mediante la precipitación química de los iones calcio y sulfato hasta obtener una solución concentrada de cloruro de sodio.

Las soluciones concentradas de cloruro de sodio se han evaluado mediante el proceso de electrodiálisis, a diferentes voltajes y caudales de alimentación; obteniéndose ácido clorhídrico e hidróxido de sodio a diferentes concentraciones. Además se han realizado análisis volumétricos para obtener las concentraciones de ácido y base obtenidos, así como los parámetros de pH y conductividad.

Palabras clave: Electrodiálisis, precipitación química, ácido HCl, base NaOH, agua de regeneración de resinas de intercambio iónico, ablandamiento de agua, medio ambiente.

ABSTRAC

The present investigation allowed the obtaining of hydrochloric acid and sodium hydroxide from the residual water of regeneration of ion exchange resins by electro dialysis technology.

During the initial stage of the investigation, a pre-treatment to the residual water of ion exchange resins regeneration was carried out by chemical precipitation of the calcium and sulphate ions until obtaining a concentrated solution of sodium chloride. The concentrated solutions of sodium chloride have been evaluated by the electro dialysis process, at different voltages and feed rates; obtaining hydrochloric acid and sodium hydroxide at different concentrations. In addition, volumetric analyzes have been carried out to obtain the concentrations of acid and base obtained, as well as the pH and conductivity parameters.

Keywords: Electrodialysis, chemical precipitation, HCl acid, NaOH base, ion exchange resin regeneration water, water softening, environment.

I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación del problema

Elevadas cantidades de agua se utilizan en la regeneración de resinas de intercambio iónico durante ablandamiento del agua, produciendo aguas con alto contenido de iones que son desechadas sin tratamiento previo, esto provoca perturbaciones en la vida acuática y en el medio ambiente.

La tecnología de electrodiálisis ha logrado obtener ácido y base a partir de concentraciones de cloruro de sodio.

Esta investigación busca obtener ácido y base a partir de las aguas de regeneración de resina de intercambio iónico y así reducir la contaminación del agua; por lo tanto, la electrodiálisis es prometedora, ya que puede operar con duración prolongada para generar ácido y base.

El ácido y base obtenidos puede ser utilizado para algunas aplicaciones que no requiere alta calidad tales como las industrias del hierro, acero decapado, zinc y cobre galvanoplastia.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Es posible obtener HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de agua de regeneración de resinas de intercambio iónico?

1.2.2. Problemas específicos

1. ¿El caudal de alimentación de NaCl influye en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico?
2. ¿La concentración de alimentación de NaCl influye en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico?
3. ¿El voltaje influye en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Obtener HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Determinar la influencia del caudal de alimentación en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico.
2. Determinar la influencia de la concentración de alimentación de NaCl en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico.
3. Determinar la influencia del voltaje en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico.

1.4. Justificación

El presente proyecto de investigación tuvo la finalidad de dar uso a las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico que son eliminadas como efluente mediante electrodiálisis.

1.4.1. Justificación legal

En la actualidad, según el DECRETO SUPREMO N°021-2009-VIVIENDA se establece en el artículo 1° Finalidad. Ámbito de Aplicación y Obligatoriedad de la Norma:

La presente norma regula mediante Valores Máximos Admisibles (VMA) las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario a fin de evitar el deterioro de las instalaciones, infraestructura sanitaria, equipos y asegurar su adecuado funcionamiento, garantizando la sostenibilidad de los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales.

1.4.2. Justificación tecnológica

Este proyecto permitió comprobar la obtención de ácido clorhídrico e hidróxido de sodio utilizando tecnología limpia, desarrollando la investigación en la tecnología de electrodiálisis.

1.4.3. Justificación económica

Este proyecto de investigación permitió obtener ácido clorhídrico e hidróxido de sodio a partir del agua de regeneración de resinas de intercambio iónico del ablandamiento de agua, logrando reutilizarse en la regeneración de resinas intercambio disminuyendo costos.

1.4.4. Justificación ambiental

Este proyecto de investigación no generó problema de contaminación ambiental más bien es una alternativa de solución ya que dio uso al agua de desecho de resinas de intercambio iónico contribuyendo así con el medio ambiente.

1.5. Importancia

La importancia de esta investigación es buscar alternativas para reutilizar el agua de desecho de regeneración de resinas obteniendo productos químicos que se puedan emplear en la industria mediante electrodiálisis, determinando parámetros de operación que pueden ser utilizados y mejorados con el avance de las tecnologías limpias impulsando la investigación y el desarrollo tecnológico.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1 Proceso de recuperación de ácido

Las Impurezas catiónicas en la regeneración de ácido residuos tales como el calcio, magnesio y sodio son transportado fuera de los residuos de ácido a través membranas de intercambio iónico, bajo la influencia de un potencial eléctrico aplicado, en compartimentos catolitos. Si una solución alcalina se utiliza como catolito el calcio y magnesio se precipitan como hidróxidos y se puede quitar por filtración. Iones sulfato se transportan fuera de los residuos de ácido a través de membranas de aniones selectivo en compartimientos anódicos, que contienen ácido sulfúrico diluido, donde forman ácido sulfúrico por reacción anódica y enriquecen la fuerza del ácido en el compartimiento anódico. El anolito es el producto de ácido fuerza moderada que contiene mucho más bajo concentraciones de calcio, magnesio y sodio que los residuos de ácido inicial. Las impurezas de iones sulfato y cloruro son transportado fuera de los residuos a través de la regeneración cáustica membranas de intercambio aniónico en compartimentos de ánodo que contiene ácido sulfúrico diluido. Por lo que se sabe, tal proceso para la recuperación cáustica. No se ha investigado el uso comercial previamente. En el caso de tratamiento de aguas residuales regeneración de plantas procesamiento, la recuperación cáustica.

[Babu R, Nott, 1981]

2.1.2. Integración de electrodiálisis monopolar y bipolar para la valorización de Salmueras de desalinización de ósmosis inversa de agua salada: Producción de ácido fuerte y base

La escasez de agua en la cuenca mediterránea se ha resuelto utilizando tecnología de ósmosis inversa de desalinización de agua de mar (SWD-RO). Esta tecnología produce salmuera que se descarga de nuevo en el mar dando como resultado un medio ambiente impactado en los ecosistemas marinos. Bajo el enfoque de la economía circular, el objetivo de este trabajo es recuperar recursos de salmuera rica en NaCl (~ 60-70 g / L), p. ej. en forma de NaOH y HCl, mediante la integración de dos intercambiadores de iones- las tecnologías de membrana basadas y cuantificar el consumo de energía eléctrica.

Electrodiálisis (ED) incorporando membranas de intercambio catiónico selectivas monovalentes como purificación y concentración de iones divalentes del NaCl presente en la salmuera SWD-RO, se integró con la membrana bipolar ED (EDBM) para producir NaOH y HCl. Densidades de corriente de 0.30-0.40 kA / m² en dos rangos de temperatura que simulan diferentes aguas de mar se probaron los regímenes de temperatura (15-18 ° C y 22-28 ° C) y se usó una solución de NaCl puro como concentrado de partida corriente. Las salmueras ricas en NaCl con 100 o 200 g de NaCl / L se obtuvieron por ED y luego se introdujeron en el EDBM apilar produciendo HCl y NaOH hasta 2 M, dependiendo de las concentraciones iniciales. Un consumo mínimo de energía de 1,7 kWh / kg de NaOH se calculó al trabajar por EDBM con concentraciones iniciales de 104 g de NaCl / L y 0,24 M HCl y NaOH. [M.Reig, S. Casas, C. Valderrama, O. Gibert ,J.L. Cortina, 2016]

2.2. Marco conceptual

2.2.1. Ácido clorhídrico

A este ácido se le llama en el comercio ácido muriático, nombre que le dio Priestley, primer químico que le recogió sobre el mercurio en el estado gaseoso.

El ácido clorhídrico se desprende en los volcanes, y se le encuentra en algunas aguas termales de la América Meridional.

Propiedades. El gas ácido clorhídrico es incoloro, de un olor muy fuerte y excesivamente picante; se liquida a la temperatura de 10° bajo una presión de 40 atmósferas; espesa vapores blancos en el aire por combinarse con la cantidad de agua en vapor que siempre contiene la atmósfera; su peso específico es 1,24 y su poder refrigerante 1,527. El ácido clorhídrico es muy soluble en el agua; este líquido disuelve más de 500 veces su volumen a la temperatura de 0°; la solubilidad del gas ácido se disminuye solamente 460 veces su volumen. A la disolución de este gas en el agua se llama ácido clorhídrico líquido, y se prepara en el aparato de Wolf. Esta disolución, concentrada en frío, tiene una densidad de 1,21 y da humos abundantes en aire.

[D Manuel Rico. D Mariano Santisteban, 1856]

2.2.2. Hidróxido de sodio

Formula: NaOH

“Peso molecular: 40,01 g/mol

Composición: Na: 57,48 %; H: 2,52 % y O: 40,00%

El hidróxido de sodio es un sólido blanco e industrialmente se utiliza como” disolución al 50 % por su facilidad de manejo. Es soluble en agua desprendiéndose calor. Absorbe humedad y dióxido de carbono del aire y es corrosivo de metales y tejidos. “Es usado en síntesis, en el tratamiento de celulosa para hacer rayón y celofán, en la elaboración de plásticos, jabones y otros productos de limpieza, entre” otros usos. “Se obtiene,

principalmente por electrólisis de cloruro de sodio, por reacción de hidróxido de calcio y carbonato de sodio y al tratar sodio metálico con vapor “de agua a bajas temperaturas.

[<https://www.clubensayos.com/ciencia/hoja-de-seguridad-hidroxido-de-sodio/2525512.html>]

2.2.3. Parámetros característicos del agua

Existen interferentes en la calidad del agua y su tratamiento.

a) Conductividad

Es producida por la cantidad de electrolitos que se encuentran disueltos en el agua.

Los electrolitos contienen iones, estos iones llevan la corriente eléctrica.

Los iones mayoritarios que forman las sales disociadas en un agua suelen ser HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ .

[N.P.G.N. Chandrasekhar.R.M, Pashey. 2015]

b) pH

El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidrógeno $[\text{H}]^+$ presentes en determinadas disoluciones.

Se define el pH como:

$$\text{PH} = - \text{LOG}_{10} [\text{a}_{\text{H}^+}]$$

[Raven. P. H, Johnson. G. B, Mason. K. A, Losos. S. R, 2014]

c) Dureza total

“La dureza total de un agua está condicionada por su contenido en sales de los metales alcalinotérreos calcio, magnesio, estroncio y bario” (formadores de dureza).

“Se define la dureza como el contenido de un agua en iones calcio, Ca^{2+} , e iones” magnesio, Mg^{2+} (iones de dureza).

[<https://es.scribd.com/document/283872126/Dureza-total>]

El grado de dureza es una medida de la concentración total, en peso, del contenido de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} , expresada como equivalente de carbonato de calcio y medida en partes por millón. [Sarah J. Bogart, 2016]

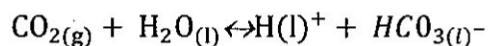
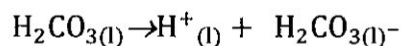
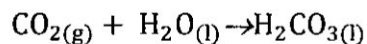
d) Alcalinidad

Es la capacidad que tiene el agua para reaccionar con iones hidrógeno.

“En aguas naturales la alcalinidad es debida principalmente a la presencia de: Bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos, los cuales se forman por la acción del CO_2 ”.

Estos” parámetros se encuentran estrechamente relacionados con el pH del agua, las ecuaciones de equilibrio que describen esta relación son las” siguientes:

La alcalinidad es la suma de los iones carbonato (CO_3^{2-}), hidróxidos (OH^-) y bicarbonato (HCO_3^-).



[Momero. J.A, 1996]

e) Cloruros

Son sales existentes en abastecimiento de agua y tiene sabor salado.

Cuando están en forma de cloruro de sodio (NaCl), la concentración es 250 ppm de NaCl.

El ion Cl⁻ “es altamente corrosivo y da lugar a deterioros o picaduras en tuberías, se puede emplear un método volumétrico” para determinar la cantidad de cloruros en el agua.

La reacción fundamental es:



En el punto final: $CrO_4^{2-}_{(ac)} + 2Ag_{(ac)}^+ \rightarrow Ag_2CrO_4(s)$ (precipitado, rojo ladrillo)

[APHA. 1995]

f) Sulfatos

Sulfato (SO₄²⁻) se encuentran en todas las aguas naturales. El origen de los compuestos de sulfatos es la oxidación de minerales de sulfito o los desechos industriales.

El nivel máximo de sulfato sugerido por la Organización Mundial de la Salud en las Guías para la calidad del agua potable es de 500 mg/l. [Shigeki Matsunaga, 2016].

2.2.4. Intercambio iónico

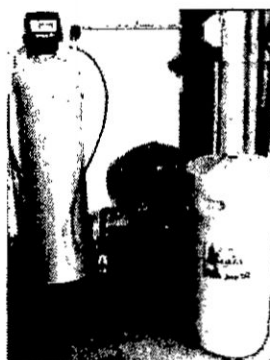
Este proceso consiste en aprovechar la capacidad que tiene las resinas de intercambiar iones entre una fase sólida y una fase líquida en forma reversible, “es decir que regresa a su estado original y sin cambio permanente en la estructura del sólido”. [<https://es.scribd.com/document/326092422/Intercambio-Ionico>]

“Las resinas de intercambio iónico están constituidas de dos partes principales: una parte estructural (matriz polimérica) y una parte funcional, que comprende el” grupo iónico activo que tiene, a su vez un ión fijo y un ión móvil.

[<http://docplayer.es/13395951-Universidad-de-guayaquil-facultad-de-ingenieria-quimica-tesis-de-grado-previo-a-la-obtencion-de-ingeniero-quimico.html>]

- El intercambiador debe tener una “alta capacidad total”, es decir que tenga un grado de sustitución iónica bastante elevado.
- La resina debe estar “químicamente estructurada” como para manifestar buenas características de equilibrio al manejar solutos. “La resina debe estar diseñada para operar en un rango adecuado de pH y tener un” grado suficiente de selectividad.
- La resina debe ser extremadamente insoluble ya que de lo contrario el producto sería alterado en calidad.
- Debe tener una buena estabilidad química, esto es resistencia a los ataques de ácidos y bases, oxidación, reducción o radiación.
- Es necesario también una buena estabilidad física.
- Es muy importante que la resina debe estar disponible a un precio tal que haga rentable el proceso. [Hidalgo.D, Guamán. P, 2006]

Figura N° 2.1 :Ablandador de agua(LOPU,UNAC)



Fuente: [Elaboración propia, 2015]

2.2.5. Resinas de intercambio iónico

Las resinas de intercambio iónico se dan diferentes usos dependiendo de la aplicación.

Tipos de resinas de intercambio iónico según el grupo funcional

- a) **Resinas catiónicas de ácido débil:** El grupo funcional es un ácido carboxílico -COOH, presente en uno de los componentes del copolímero, el ácido acrílico o metacrílico.
- b) **Resinas Catiónicas de ácido fuerte:** Se producen por sulfonación del polímero con ácido sulfúrico.
El grupo funcional es el ácido sulfúrico, $\text{H}(\text{SO}_3)^-$
- c) **Resinas aniónicas de base fuerte.** Se obtienen a partir de la reacción de copolímeros de estireno-divinilbencenoclorometilados con aminas terciarias.
El grupo funcional es una sal de amonio cuaternario, R_4N^+ .
- d) **Resinas aniónicas de base débil:** Resinas funcionalizadas con grupos de amina primaria, $-\text{NH}_2$, secundaria, $-\text{NHR}$, y terciaria, $-\text{NR}_2$. “Suelen aplicarse a la adsorción de ácidos fuertes con buena capacidad, pero su cinética es lenta”.

2.2.6. Reacción de intercambio iónico

“Los intercambiadores iónicos son matrices sólidas que contienen sitios activos (también llamados grupos ionogénicos) con carga electrostática, positiva o negativa, neutralizada por un ión de carga opuesta (contracción).

En estos sitios activos tiene lugar la reacción de” intercambio iónico.

[<http://docplayer.es/13395951-Universidad-de-guayaquil-facultad-de-ingenieria-quimica-tesis-de-grado-previo-a-la-obtencion-de-ingeniero-quimico.html>]

“Esta reacción se puede ilustrar con la siguiente ecuación tomando como ejemplo el intercambio entre el ión sodio, Na^+ , que se encuentra en los sitios activos de” la matriz R, y el ión calcio, Ca^{2+} , presente en la disolución que contacta dicha matriz.

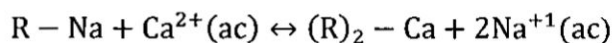
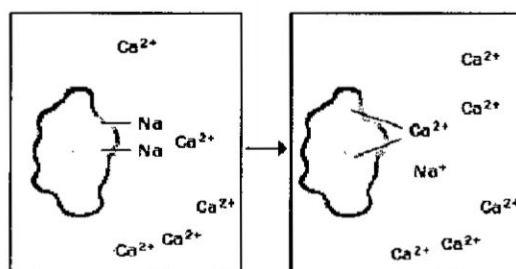


Figura N° 2.2 Representación de los sitios activos de una membrana



Fuente: [Hidalgo. D, Guamán. P, 2006]

A medida que la disolución “pasa a través de la resina, los iones presentes en dicha disolución desplazan a los que estaban originariamente en los sitios activos”. La eficiencia “depende de factores como la afinidad de la resina por un ión en particular, el pH de la disolución, si el grupo activo tiene carácter ácido” o básico, la concentración de iones, etc. [<https://es.scribd.com/document/226713729/intercambiadores-ionicos>]

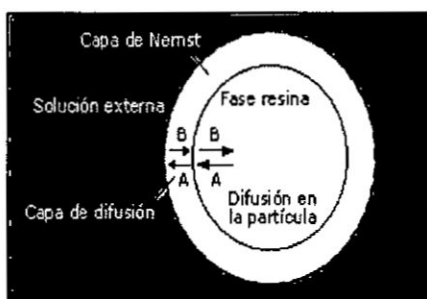
Es obvio que para que tenga lugar el intercambio iónico, los iones deben moverse de la disolución a la resina y viceversa.

Este movimiento es el proceso de difusión. La “difusión de un ión está en función de su dimensión, carga electrostática, la temperatura y también está influenciada por la estructura y tamaño de” poro de la matriz.

“El proceso de difusión tiene lugar entre zonas de distinta concentración de iones, de más concentrado a menos, hasta que tengan la misma concentración”.

[<http://docplayer.es/13395951-Universidad-de-guayaquil-facultad-de-ingenieria-quimica-tesis-de-grado-previo-a-la-obtencion-de-ingeniero-quimico.html>]

Figura N° 2.3 Proceso de difusión de la resina

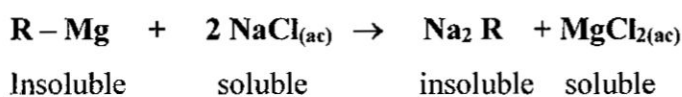
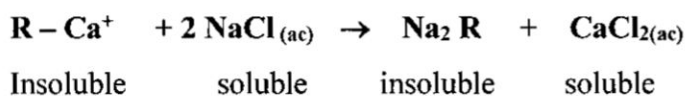


Fuente: [Hidalgo. D, Guamán. P, 2006]

2.2.7. Regeneración de la resina

La resina agotada es tratada con una solución de cloruro de sodio (Salmuera) con una concentración de aproximadamente 10 % para que el sodio pueda remover el calcio y magnesio de la resina agotada.

El proceso de regeneración es realizado de acuerdo a la siguiente ecuación:



El ciclo de regeneración, el cual regenera la resina agotada, se realiza en cuatro pasos: (retrolavado, regeneración, lavado lento, y lavado rápido).

a. Retrolavado

EL retrolavado es el primer paso de la regeneración y consiste en introducir agua cruda por la parte inferior del lecho, para remover el material suspendido y aflojar el "lecho de resina. Normalmente se realiza en 10 minutos o cuando el agua de retrolavado se torne clara".

b. Regeneración de la resina

La etapa de regeneración propiamente dicha consiste en pasar el regenerante por la parte superior del lecho, al 10% de concentración y a un flujo de 0,5 a 1,0 GPM/ pie³ de resina para asegurarse un adecuado tiempo de contacto y eficiencia de la regeneración.

c. Lavado Lento

Este es el próximo paso a seguir, el agua permite desplazar el remanente de salmuera hacia la parte inferior del lecho al mismo flujo de la regeneración. Esto permite una completa regeneración debido a que se asegura el contacto con la parte inferior del lecho.

d. Lavado rápido

“Finalizado el lavado lento se inicia el lavado rápido para remover el residuo de sal del lecho de resina y se realiza a una rata de flujo de 1,5 GPM / pie³ de resina.

Generalmente, la unidad retorna al servicio cuando el contenido de cloruro del efluente es igual al del influente”

La frecuencia de la regeneración depende del caudal de agua, de la cantidad de calcio y magnesio en el agua, la cantidad de resina y de la cantidad de sal usada por regeneración. [Hidalgo. D. Guamán. P, 2006].

2.2.8. Agua de regeneración de resina de intercambio iónico

Cuando la resina está saturada de Ca^{+2} y Mg^{+2} se hace pasar una solución concentrada de cloruro de sodio, de modo que todos los iones de sodio que están en líquido, reemplacen a Ca^{+2} y Mg^{+2} , así activando la resina.

La solución con iones que provocan la dureza se llama agua de regeneración de resina de intercambio iónico.

Ecuación de regeneración de la resina:

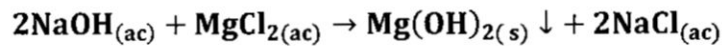
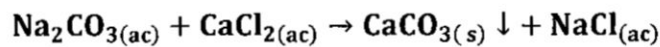
Agua de lavado + Resina inactivada \longrightarrow **Agua de descarte + Resina regenerada**

(Alta concentrada Na^+) (Saturada Ca^{2+} y Mg^{2+}) (Con Ca^{2+} y Mg^{2+}) (Saturada Na^+)

2.2.9. Precipitación química de dureza y sulfatos

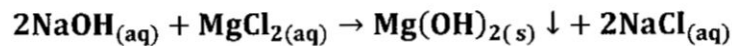
a) Eliminación de la dureza

Se denomina al ablandamiento del agua el más usado es la de adición de carbonato sódico que conlleva la eliminación de Ca^{2+} mediante la reacción:



Un proceso para la eliminación de la dureza del agua, es la descalcificación de ésta mediante resinas de intercambio iónico.

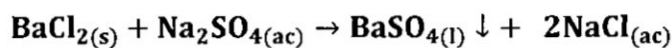
Método de cal - soda El proceso de ablandamiento con cal - soda ($\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{Na}_2\text{CO}_3$) precipita la dureza del agua.



[A, Rodríguez Sergio, 2010]

b) Eliminación de sulfatos

Al adicionar cloruro de bario (BaCl_2) se forma sulfato de bario (BaSO_4):



Las aguas residuales contienen entre 20 y 500 mg de sulfato /l mientras que ciertos efluentes industriales pueden contener varios miles de miligramos por litro.

Las aguas residuales sin procesar tienen un rango de pH de 2- 8.

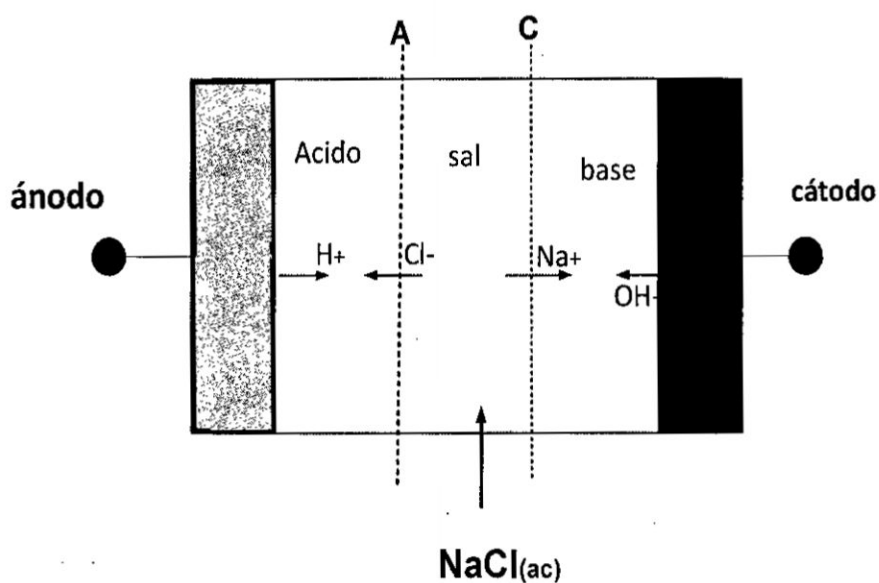
La variación del pH en el rango de 2- 8 dio como resultado pequeños cambios en la concentración de sulfato, por lo tanto, la cantidad de hidroxilos presentes no interfiere en la precipitación de sulfato de bario porque la formación de $Ba(OH)_2$ y $Ca(OH)_2$, requiere otras condiciones de interferencia, debido a su alta solubilidad,

[Nathan Pember, 2016].

2.2.10. Electrodialisis

La electrodialisis es una tecnología de membranas que permite, bajo 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. [Medina.R, 2007].

Figura N° 2.4 Proceso de electrodialisis



Fuente: [Medina.R, 2007]

a. Principio de la electrodiálisis

“Cuando se establece un campo eléctrico en un electrodiálizador, los iones migran hacia el ánodo o el cátodo, según el signo de su” carga.

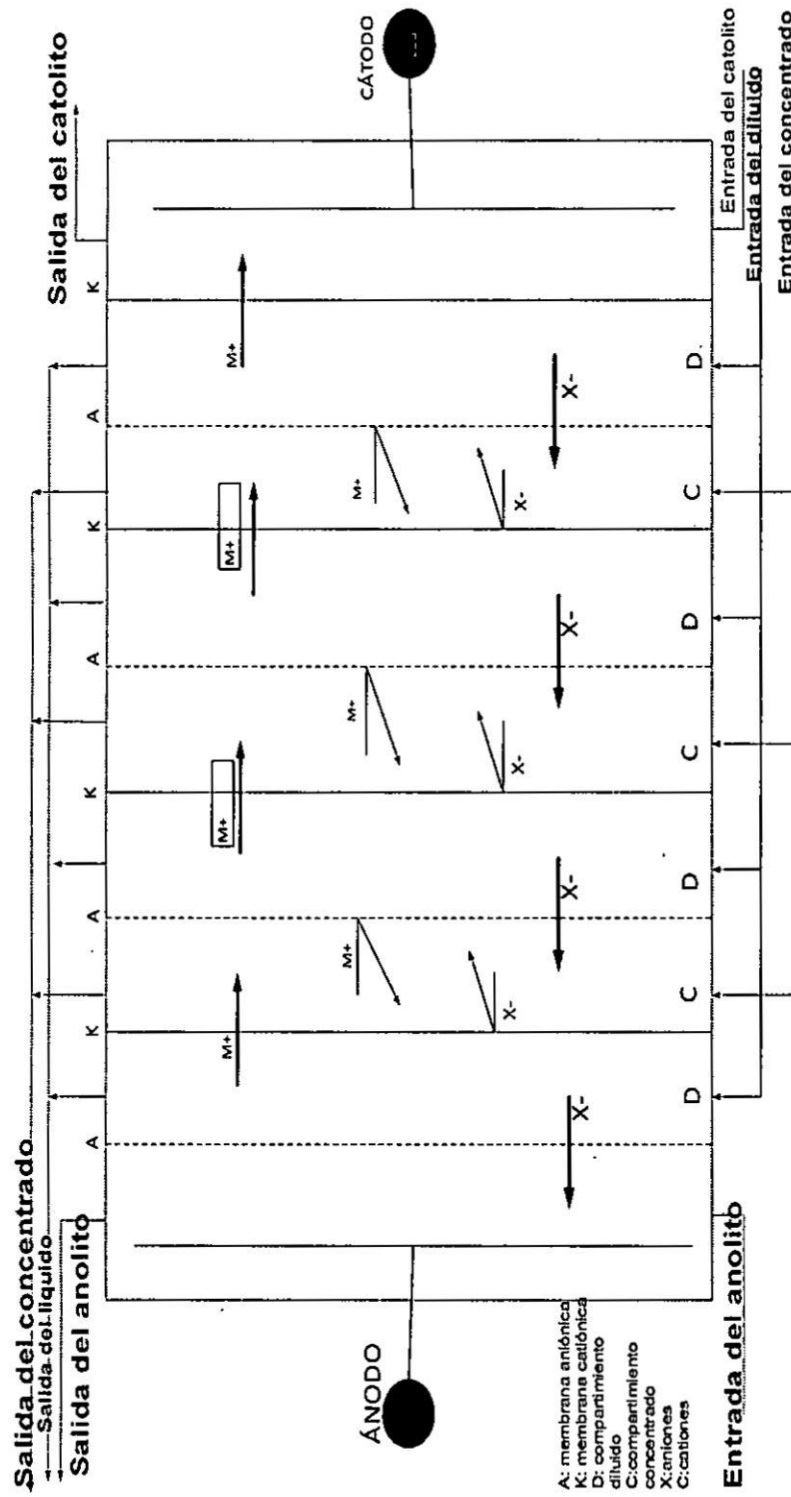
[<https://es.scribd.com/document/326491418/desalinizacion>]

Los cationes que están en un compartimento de diluidos migran hacia el cátodo, encontrándose con una membrana catiónica, que permite el transporte, pasando al compartimento adyacente donde en su camino se encuentra con una membrana aniónica que no puede atravesar, quedando retenidos en este compartimento.

[Medina.R, 2007]

Los aniones migran el ánodo, encontrándose una membrana aniónica que pueden atravesar y luego en su trayectoria se encuentran con una membrana catiónica que no permite su transporte quedando retenidos en este compartimento. Para que ocurra el funcionamiento descrito el módulo de electrodiálisis debe estar formado por dos electrodos metálicos que establecen el campo eléctrico, cátodo, ánodo como:

Figura N° 2.5 Esquema de un módulo de electrodiálisis de celdas de dos compartimentos



Fuente: [Medina.R,2007]

b. Componentes básicos de un módulo de electrodiálisis

Sus componentes básicos son:

- **Electrodos**

Los electrodos son materiales conductores, 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 únicamente cumplen la función de proporcionar el campo eléctrico necesario para que se produzca el proceso. Por lo tanto son DSAs (Ánodos dimensionalmente estables como los elaborados con óxidos metálicos como dióxido de estaño) o Pt/Ti (platino sobre titanio) como ánodos y acero inoxidable como cátodo. [Medina.R,2007]

- **Membranas**

Los criterios más importantes que se toman en cuenta para seleccionar las membranas de intercambio iónico, son los de alta permi-selectividad y baja resistencia eléctrica. La única excepción la constituyen las membranas que delimitan compartimentos electródicos (de soluciones de lavado). Estas últimas deben ser perfluoradas, de alta resistencia química, ya que se enfrentan a un ambiente químico mucho más agresivo que el resto de membranas del módulo (oxidante en el ánodo y valores extremos de pH, ácido en el ánodo y básico en el cátodo).

Existen muchos tipos de membranas con funciones y propiedades muy particulares, en el caso de la electrodiálisis se usa membranas cargadas eléctricamente o mejor conocidas como membranas de intercambio iónico.

Las características principales de este tipo de membrana son su alta selectividad hacia especies iónicas, poseen una resistencia eléctrica baja (0,3 y 0,2 mili-ohm/m²), buena resistencia mecánica y gran estabilidad química y biológica.

Químicamente estas membranas son resinas de intercambio iónico de forma de láminas cuyo espesor está entre 0,15-0,16 mm.[Medina.R,2007]

a. Tipos de membranas de intercambio iónico

Las membranas de intercambio iónico son membranas aniónicas y catiónicas las cuales contienen grupos fijos cargados positivos y negativos. Por ejemplo, una vez que la membrana se encuentra en contacto con una solución acuosa los aniones móviles que ésta contiene pueden ser desplazados hacia la solución y reemplazados por aniones presentes en la fase acuosa (a los que la membrana resulta permeable).

“Los cationes inmóviles, por otro lado, obstaculizan el transporte de especies positivamente cargadas que se encuentran en la” solución ya que éstos permanecen en la fase membrana.

[http://www.bdigital.unal.edu.co/943/1/1037576743_1036604401_2009.pdf]

Es así como las membranas aniónicas permiten el paso de aniones a la vez que obstaculizan el flujo de cationes. Las membranas catiónicas operan de igual forma, pero al tenerse cationes móviles y aniones fijos, estas permiten el flujo de especies con carga positiva. [Medina.R,2007]

- Membrana de intercambio catiónica

Una membrana catiónica es una lámina que contiene una matriz porosa de resina (cadenas poliméricas como por ejemplo poliestireno) en la cual están fijos grupos electronegativos, los grupos de intercambio más usuales son los sulfonato y carboxilato: $-\text{SO}_3^-$, $-\text{COO}^-$, $-\text{PO}_3^{2-}$, $-\text{SO}_2\text{R}$, Estos grupos electronegativos deben ser balanceados por los contraiones de carga positiva (cargas móviles), que son fácilmente transportados de un grupo a otro.[Medina.R,2007]

- Membrana de intercambio aniónico

Una membrana aniónica permitirá sólo el paso de aniones claro que en este caso los grupos fijos son de carga positiva, utilizando grupos de intercambio aniónico tales como el amonio cuaternario o amina terciaria: $-\text{NR}_3^+$, $-\text{NH}_3^+$, $-\text{NH}_2\text{R}^+$, PR_3^+ , (NR_3^+ , NH_3^+) balanceados con grupos móviles negativos. [Medina.R, 2007]

- **Espaciadores**

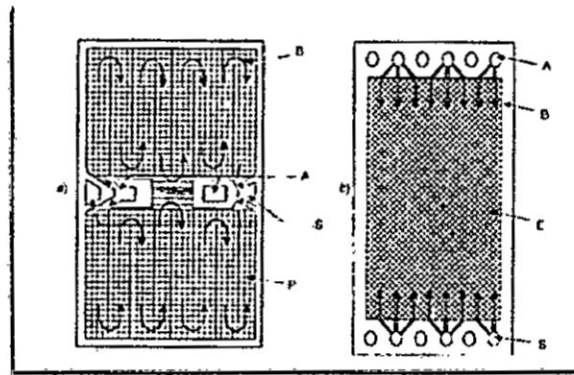
Los espaciadores son materiales plásticos (polietileno, poliéster) en forma de malla que se colocan entre cada par de membranas. Sus funciones son las siguientes:

- Proporcionar los canales de flujo a través de los cuales fluyen disoluciones.
- Sellar las celdas.
- Soportar las membranas.

Actualmente existen dos tipos básicos de espaciadores que se diferencian por el recorrido que la disolución realiza por el interior de los compartimentos del módulo.

- De flujo tortuoso (tortuouspath)
- De flujo laminar (sheetflow)

Figura N° 2 6 Tipos de Espaciadores



Fuente: [Medina.R,2007]

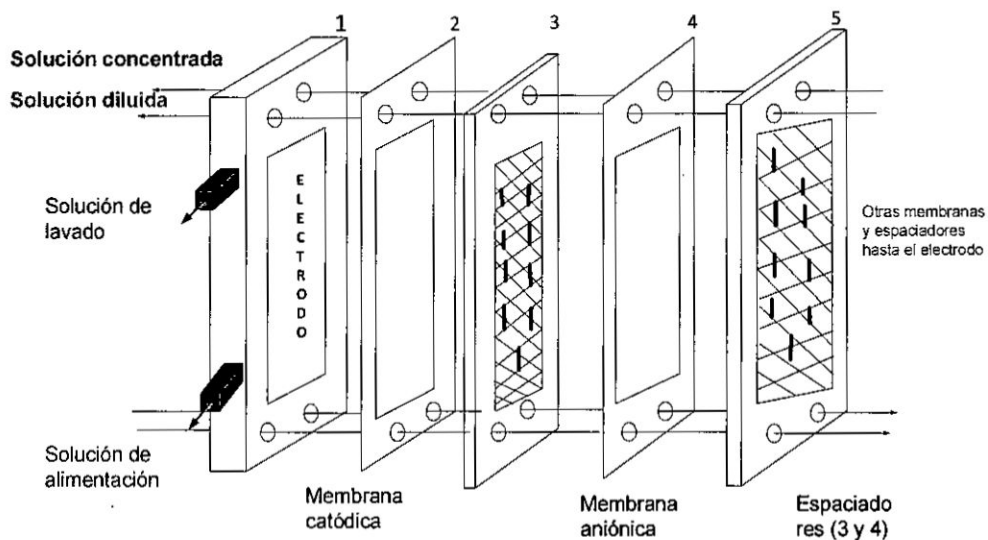
- a) flujo tortuoso b) flujo laminar. A: entrada de la dilución de alimentación, B: camino de flujo, E: malla espaciadora de plástico, P: promotores de turbulencias: salida de la disolución del producto.

- **Juntas**

Su objetivo es doble. Evitar fugas de electrolito en la celda, ya que es fuente importante de problemas tales como cortos circuitos; y evitar la mezcla de las

corrientes que fluyen por los compartimentos concentrados y diluidos. Deben poseer alta estabilidad química y resistencia mecánica. [Medina.R,2007]

Figura N° 2.7 Esquema de un módulo de electrodiálisis



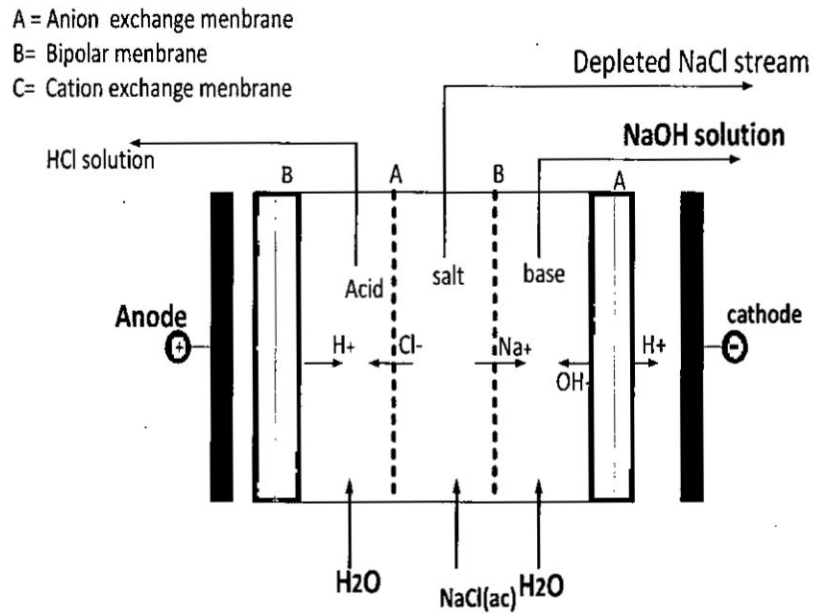
Fuente: [Medina.R, 2007]

2.2.11. Procesos de obtención de ácido y base

a) EDMB para la obtención de ácidos y bases a partir de disoluciones salinas

La producción de ácidos y bases a partir de disoluciones salinas es uno de los campos en los que la EDMB tiene mayor potencial. Su interés reside en incluirla como parte del proceso de desalinización de agua de mar, integrada con otras operaciones como la ósmosis inversa, para valorizar las salmueras concentradas

Figura N° 2.8 Esquema típico de funcionamiento para la EDMB en la producción de ácidos y bases



Fuente: [Valverde Estrella. Edgar, 2014]

Como puede verse en la figura, la disolución de NaCl pasa entre las membranas homopolares y de acuerdo a los principios básicos del proceso, los protones e hidroxilos que proporciona la membrana bipolar, concentran las corrientes ácida y básica para obtener HCl y NaOH.

Otro ejemplo de sal utilizada para obtener ácidos y bases es el sulfato de sodio (Na_2SO_4) para la producción de ácido sulfúrico (H_2SO_4) e hidróxido de sodio (NaOH). [Valverde Estrella. Edgar, 2014].

b) Proceso de Electrólisis Celdas de membranas de Intercambio iónico.

En el proceso de electrólisis se produce la separación de la salmuera y se produce cloro gaseoso, hidrógeno y soda cáustica.

[<https://es.scribd.com/presentation/345253749/electro-obtencion-cloro-sosa>]

La reacción que se produce al interior de las celdas es la siguiente:



La salmuera ultra pura ingresa por la zona del anolito, a su vez la soda que retorna al proceso se ajusta a una concentración desde un 32,2% a un 31,6%.

El cloro gas abandona la celda por la sección del anolito. Dicha corriente viene sobre saturada en agua, por tanto a la salida de la cañería se produce un flasheo de la corriente separándose en una corriente gaseosa de cloro en agua y una corriente líquida saturada en cloro, que se almacena en el estanque de anolito.

El estanque de anolito tiene un venteo conectado al sistema de recolección de cloro, este sistema totalmente hermético previene que vapores con cloro puedan diseminarse por el área de proceso.

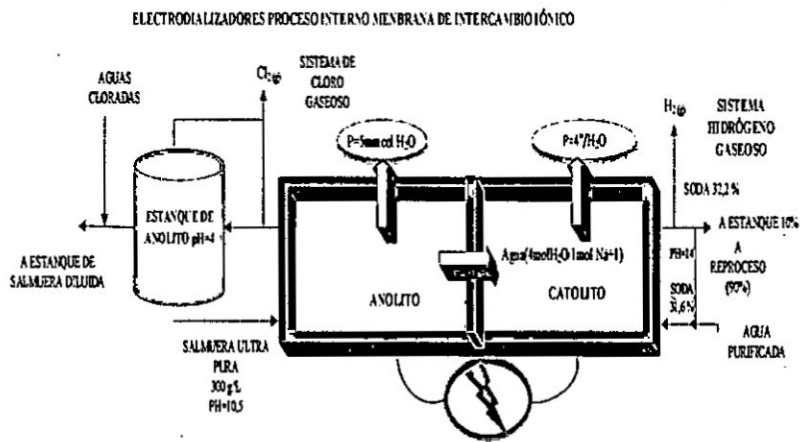
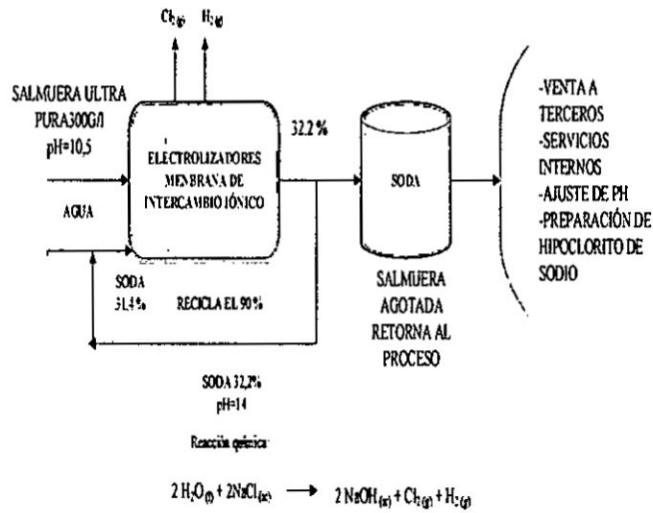
Del “estanque de anolito, previo ajuste de pH con soda, las aguas cloradas se recuperan en el estanque de salmuera débil para” reproceso.

Desde la zona del anolito, el agua junto con los iones de sodio traspasa la membrana de la celda a la zona del católito, donde se produce la generación de hidrógeno y de soda.

En el catolito, la soda que ingresa se concentra a un 32,2% y abandona la sección junto con el hidrógeno formado, la corriente se flashea separándose en dos.

Una corriente gaseosa de hidrógeno saturado en agua y una corriente de soda líquida. [Revillard Ulloa, 2005]

Figura N° 2.9 Diagrama de flujo de Producción de Cloro-Soda

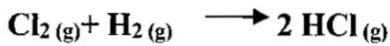


Fuente: [Revillard Ulloa, 2005]

- **Síntesis de ácido clorhídrico.**

La síntesis del ácido clorhídrico se produce por la reacción del cloro gas y el hidrógeno gas en un reactor.

La reacción que se produce al interior del reactor es la siguiente:



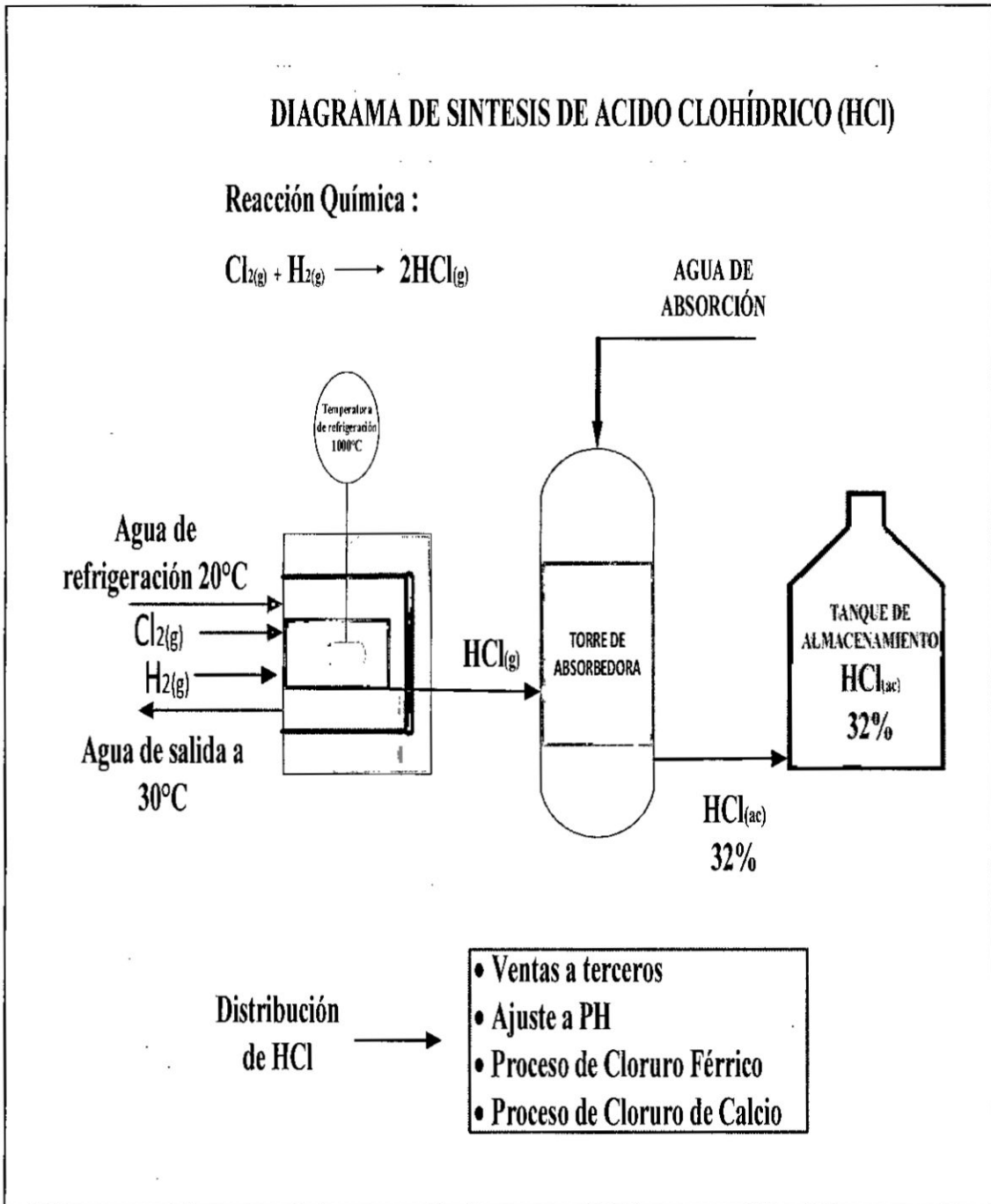
La reacción es exotérmica, por lo que la temperatura se eleva sobre 1000 °C en el interior del reactor, para el control de la temperatura el equipo está revestido con una camisa de grafito, por la cual se incorpora agua de refrigeración.

Una vez producida la reacción de síntesis, el ácido clorhídrico en estado gas abandona el reactor e ingresa a la torre de absorción, donde “por el tope se alimenta agua desmineralizada, mediante un sistema de aspersion para controlar el tamaño de gota y proveer una mayor superficie” de contacto con la corriente gaseosa.

La “absorción del ácido en estado gaseoso en el agua desmineralizada permite obtener una solución de ácido clorhídrico al 32%, que se deriva a los estanques” de almacenamiento, desde “donde se destina a los siguientes usos internos, ajuste de pH, como materia prima en el proceso de producción de cloruro de calcio, para neutralización” de efluentes.

[<https://es.scribd.com/document/231660702/Obtencion-Del-Cloruro-de-Calcio>].

Figura N°2.10 Síntesis de ácido clorhídrico



Fuente: [Revillard Ulloa, 2005]

2.2.12. Diseño de experimentos

A un proceso químico, ingresan diversas variables que interactúan entre ellas para la producción de un resultado, "Las variables que ingresan al proceso se denominan variables de entrada, y el resultado, variable de salida".

"El nivel de la variable de salida depende de los niveles que adopten las variables de entrada".

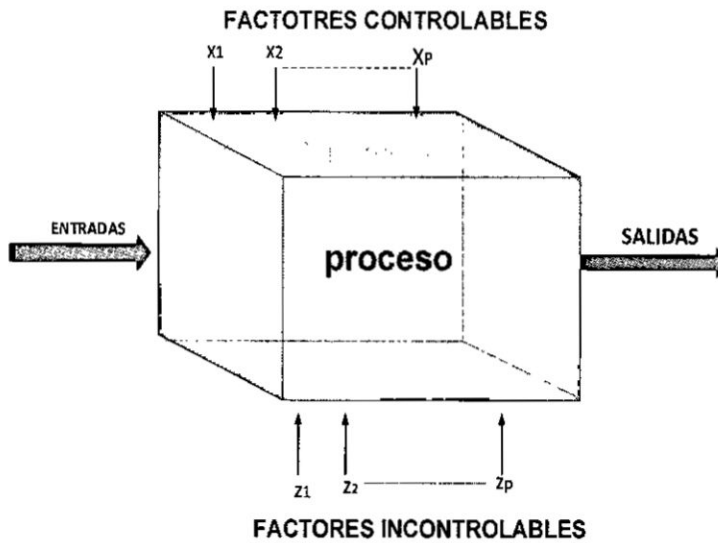
[<http://www.ucema.edu.ar/publicaciones/download/documentos/258.pdf>]

"El diseño experimental es las combinaciones óptimas de las variables de entrada, que es un conjunto de pruebas durante el cual se realizan cambios" sistemáticos y controlados a las variables de entrada para medir el efecto sobre la variable de salida."

[<https://es.scribd.com/document/98904413/Apuntes-de-Diseno-Experimental>]

Figura N°2.11 Diagrama de diseño experimental

ESQUEMA DE UN PROCESO O SISTEMA



Fuente: [Medina.C, 2009]

Este método consiste en proponer todas las combinaciones posibles de las variables o factores en estudio, utilizando el método de dos niveles. Una factorial con dos niveles, significa que cada factor tiene dos niveles para cada una de las variables que se están estudiando y el número de experimentos que se obtienen de todas las combinaciones posibles de los niveles de cada variable independiente.

Este método factorial nos permite obtener el máximo de información con un mínimo de experiencias desarrolladas. [Tanco.R.2008].

- **Variables independientes (X)**

Denominados también factores, son las variables bajo estudio, las cuales se mantienen controlando durante el experimento y se modifican sistemáticamente para investigar su efecto en los resultados.

[Medina.C, 2009]

- **Variables dependiente o respuesta (Y)**

La variable dependiente denominada también respuesta, es aquella que se determina en el desarrollo de cada experimento y sus valores dependen de la variable independiente. [Medina.C, 2009]

Notación de los niveles de un factor.

Los dos niveles de cada variable independiente, se representa por (+) y (-) (0) y (1) lo cual indica el nivel superior y el nivel inferior para cada uno de los factores.

[Medina.C, 2009]

Diseño factorial de 3 variables a 2 niveles (2^3)

Tabla N °2.1: Matriz de experiencias

Experimento	X ₁	X ₂	X ₃	Respuesta
1	-	-	-	Y ₁
2	+	-	-	Y ₂
3	-	+	-	Y ₃
4	+	+	-	Y ₄
5	-	-	+	Y ₅
6	+	-	+	Y ₆
7	-	+	+	Y ₇
8	+	+	+	Y ₈

Fuente: [Medina.C, 2009]

- **Pruebas experimentales**

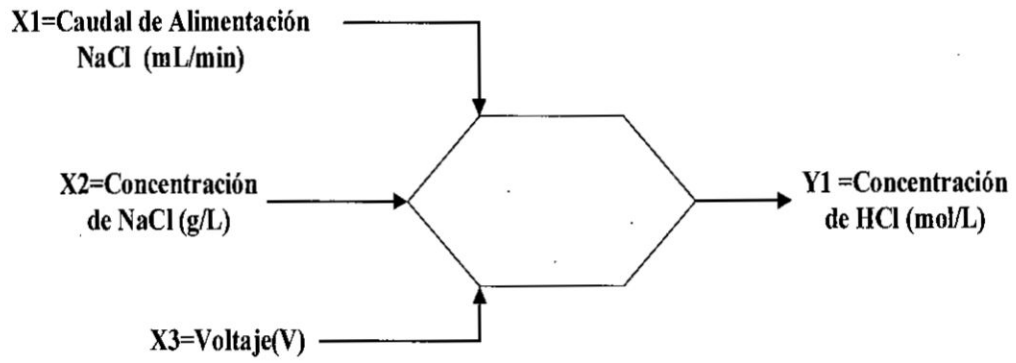
Para el desarrollo de las pruebas experimentales las variables identificadas y niveles considerados en el estudio, fueron los siguientes:

Tabla N°2.2 Variables experimentales

N°	Variables Dependientes	Notación
1	Caudal de alimentación NaCl (mL/min)	X1
2	Concentración de alimentación NaCl(g/L)	X2
3	Voltaje(V)	X3
N°	Variable Independiente	Notación
4	Concentración de HCl (mol/L)	Y1
5	Concentración de NaOH (mol/L)	Y2

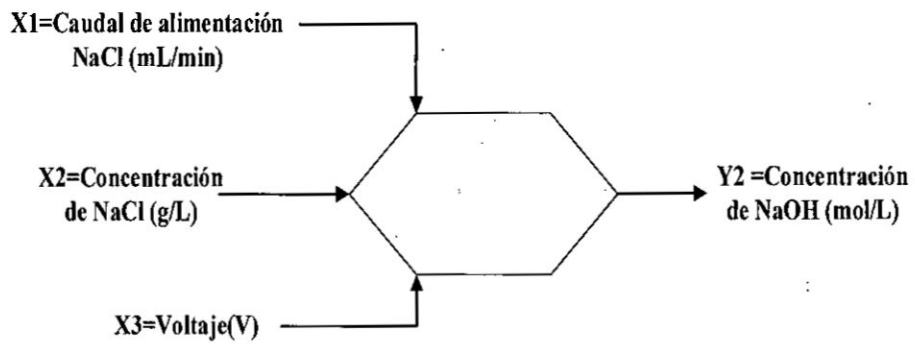
Fuente: [Elaboración propia. 2017]

Figura N°2.12 Variables experimentales para HCl



Fuente: [Elaboración propia.2017]

Figura N° 2.13 Variables experimentales para el NaOH



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

2.3. Definición de términos

2.3.1. SWD-RO. Ósmosis inversa de desalinización de agua de mar

2.3.2. ED: Electrodialisis

2.3.3. EDMB: Electrodialisis con membrana bipolar

2.3.4. GPM: Galones por minuto

III. VARIABLES E HIPÓTESIS.

3.1. Variables de investigación

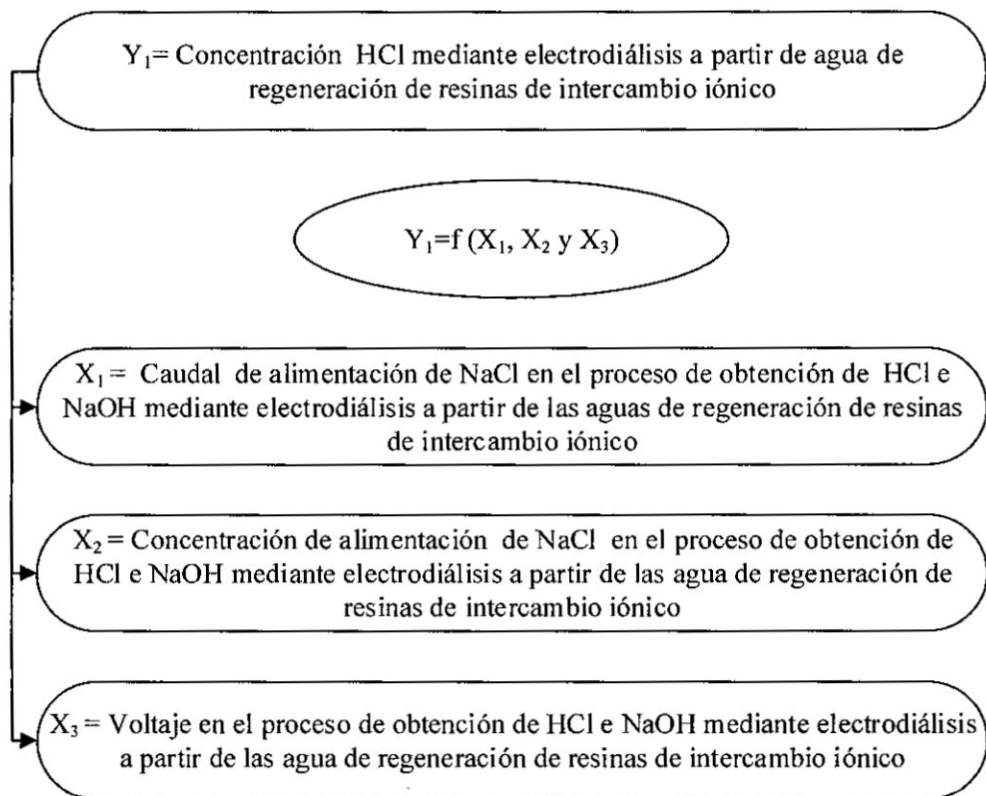
La presente investigación se caracteriza por ser transversal estudiando la variable en un momento de tiempo determinado, por ser éste el determinante en la relación causa efecto.

Por su naturaleza, todas las variables identificadas son del tipo cuantitativas. Por su dependencia Y_1 e Y_2 son dependiente, y las variables X_1 , X_2 y X_3 son independientes.

Es decir: $Y_1=f(X_1, X_2 \text{ y } X_3)$ y $Y_2=f(X_1, X_2 \text{ y } X_3)$

Para ácido clorhídrico:

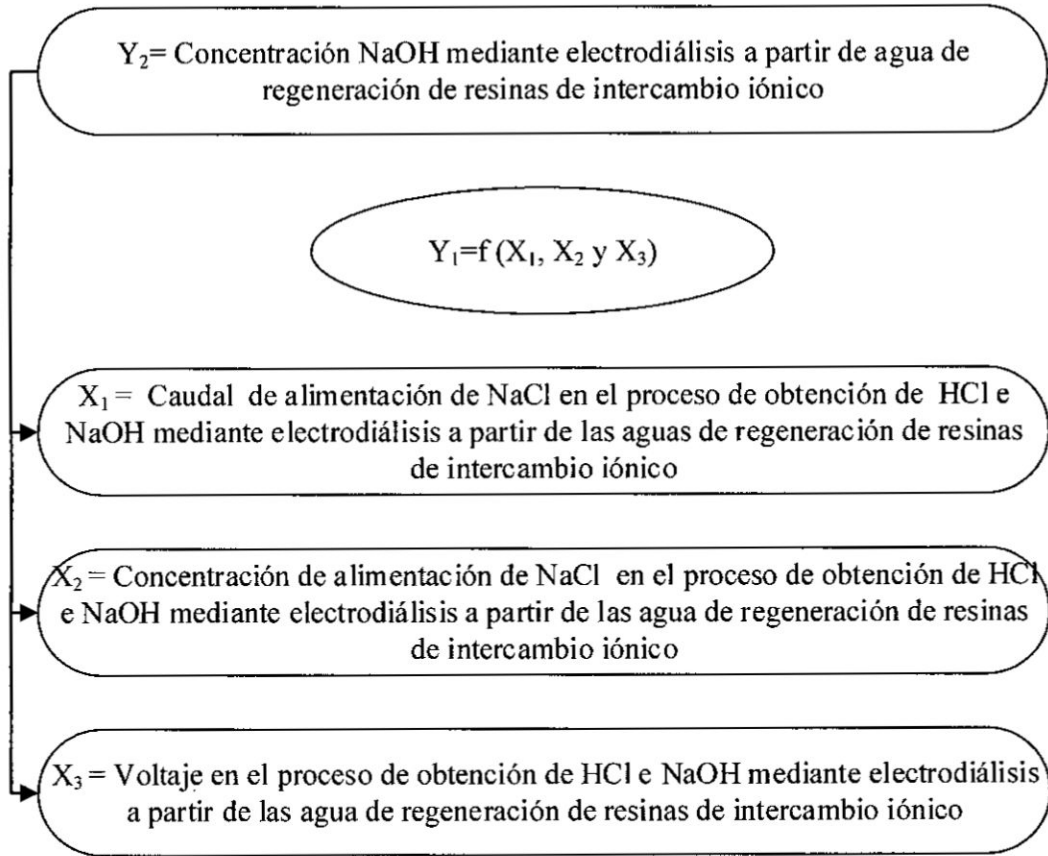
Figura N°3.1 Relación de variables para el HCl



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Para hidróxido de sodio:

Figura N° 3.2 Relación de variables de NaOH



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

3.2. Operacionalización de variables

Tabla N° 3.1 Ácido clorhídrico

VARIABLE DEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
Y ₁ = Concentración HCl mediante electrodiálisis a partir de agua de regeneración de resinas de intercambio iónico	-Concentración de HCl -pH -Conductividad	-mol/L -Adimensional -ms/cm	- Procedimiento experimental -Análisis titulométrico Acido-Base -Medición de conductividad y pH
VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
X ₁ = Caudal de alimentación de NaCl en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico.	-Caudal de alimentación de NaCl	-mL/min	- Procedimiento experimental -Medición de caudal de alimentación
X ₂ = Concentración de alimentación NaCl en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las agua de regeneración de resinas de intercambio iónico	-Concentración de alimentación NaCl.	-g/L	- Procedimiento experimental: -Análisis titulométrico: Cloruros.
X ₃ = Voltaje en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las agua de regeneración de resinas de intercambio iónico	-Voltaje	-V	- Procedimiento experimental: -Medición de voltaje

Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Tabla N° 3.2 Hidróxido de Sodio

VARIABLE DEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
Y ₂ = Concentración NaOH mediante electrodiálisis a partir de agua de regeneración de resinas de intercambio iónico	-Concentración de NaOH -pH -Conductividad	-mol/L -Adimensional ms/cm	- Procedimiento experimental -Análisis titulométrico Acido-Base -Medición de conductividad y pH
VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
X ₁ = Caudal de alimentación de NaCl en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico	-Caudal de alimentación de NaCl	- mL/min	- Procedimiento experimental -Medición de caudal de alimentación
X ₂ = Concentración de alimentación de NaCl en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las agua de regeneración de resinas de intercambio iónico	-Concentración de alimentación de NaCl.	-g/L	- Procedimiento experimental: -Análisis titulométrico: Cloruros.
X ₃ = Voltaje en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las agua de regeneración de resinas de intercambio iónico	-Voltaje	-V	- Procedimiento experimental: -Medición de voltaje

Fuente: [Elaboración propia, 2017]

3.3. Hipótesis

3.3.1. Hipótesis general

Se obtendrá de HCl e NaOH con una concentración de 0,2 M de HCl y 0,2 M de NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico.

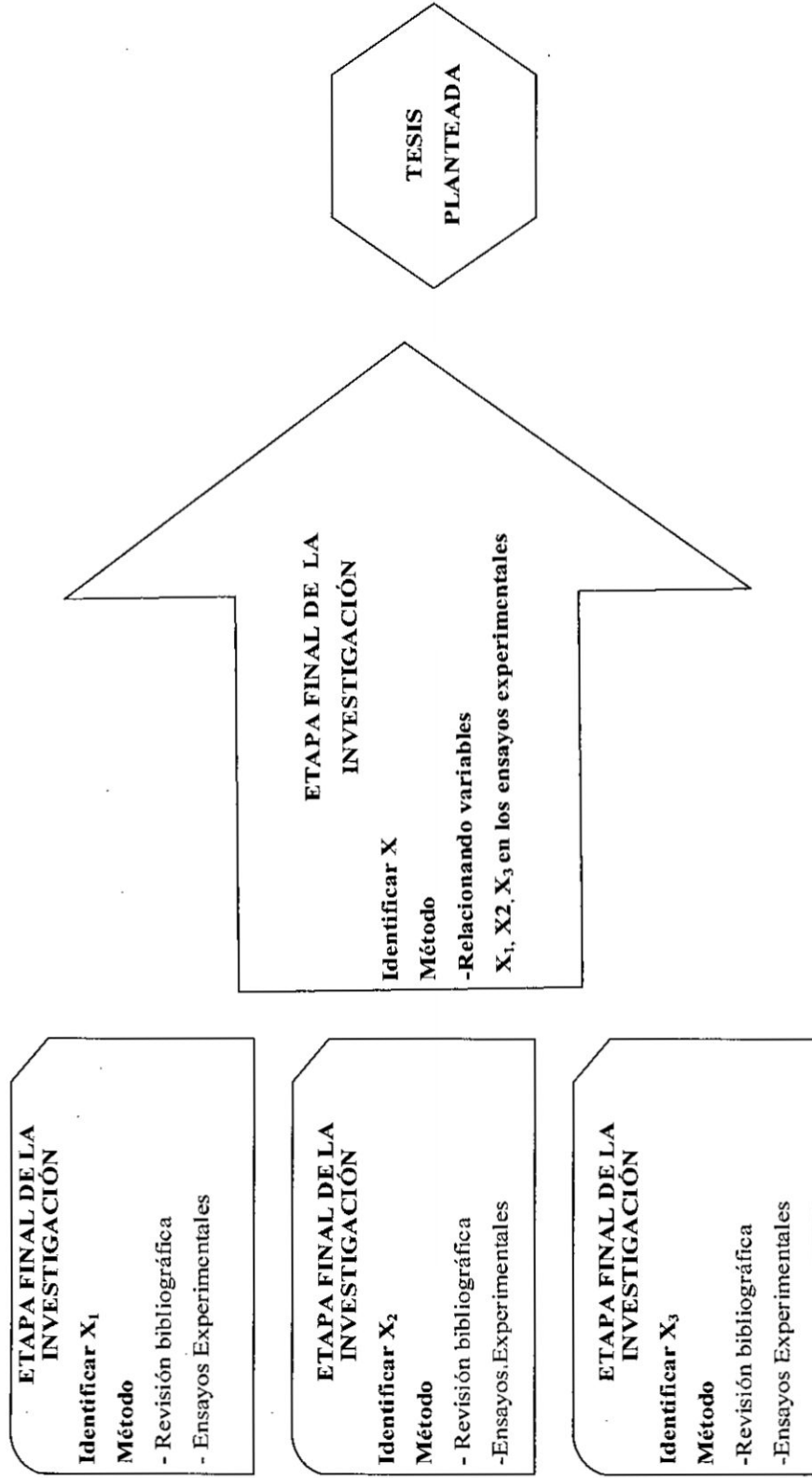
3.3.2. Hipótesis específica

H₀₁: Influirá positivamente el caudal de alimentación de cloruro de sodio en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico.

H₀₂: Influirá positivamente la concentración de alimentación de NaCl en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico.

H₀₃: Influirá positivamente el voltaje en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico.

Figura N°4.1 Diseño de la Investigación



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

La población está representada por el volumen del agua de regeneración de resinas de intercambio iónico de una planta piloto que utiliza agua de caño como materia prima para obtener agua destilada.

La muestra útil para la presente investigación fue seleccionada del agua de regeneración de resinas de intercambio iónico con las siguientes características:

- Un régimen de operación de 30 minutos por cada regeneración y trabajando 3 días a la semana del equipo de ablandamiento del agua, se desecha 200 litros de agua de regeneración de resina de intercambio iónico que tiene alta concentración de NaCl de los cuales se utiliza 30 litros para la experimentación.
- El agua fuente que se utiliza para la diluir la sal de cloruro de sodio (NaCl) la cual regenera las resinas de intercambio iónico es agua proveniente de la red pública del abastecimiento de agua (agua potable).

Se consideran estas características para la selección de la muestra y evitar compuestos disueltos, metales pesados y algunos iones que interfieran en la experimentación.

4.3.2. Muestra

- La muestra fue tomada de una planta piloto que utiliza agua potable como materia prima para obtener agua destilada.
- Se tomó una muestra de 30 litros del agua de regeneración de resinas de intercambio iónico para realizar la precipitación química.
- Para cada corrida experimental se utilizó 0,5 litro de agua tratada con dos concentraciones diferentes de cloruro de sodio (NaCl) de 38,5 g/L y 48,5 g/L.

4.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

4.4.1. Técnicas a utilizar

Las técnicas que se utilizaron para la recolección de datos:

- Medición y registro del potencial eléctrico e intensidad de corriente eléctrica durante cada ensayo experimental.
- Medición y registro del caudal de alimentación durante cada ensayo experimental.
- Medición y registro de concentración de alimentación de NaCl y durante cada 30 minutos durante cada ensayo de 210 minutos en todos los ensayos experimentales realizados.
- Medición y registro de la concentración obtenida de HCl e NaOH cada 30 minutos durante cada ensayo de 210 minutos en todos los ensayos experimentales realizados.
- Medición y registro de la conductividad de NaCl, HCl e NaOH cada 30 minutos durante cada ensayo de 210 minutos en todos los ensayos experimentales realizados.
- Medición y registro del pH de NaCl, HCl e NaOH cada 30 minutos durante cada ensayo de 210 minutos en todos los ensayos experimentales realizados
- Análisis por el método de diseño factorial para la interrelación de 3 variables durante los ensayos experimentales a 2 niveles.

4.4.2. Equipos, materiales y reactivos.

Equipos

- Equipo de test de Jarras
- Equipo de electrodiálisis

Materiales

- Soporte universal
- Pinza para soporte universal
- Bureta de 25 mL
- Vasos precipitados 100mL,250mL y 1L
- Pipetas de 10 mL y 5mL
- Matraces Erlenmeyer de 250 mL
- Espátula
- Bombilla
- Piceta
- Probetas de 100 mL y 500 mL
- Conductímetro
- PH metro
- Agitador magnético
- Turbidímetro
- Cocinilla
- Balanza

Reactivos

- Cromato de Potasio(K_2CrO_4)
- Nitrato de Plata($AgNO_3$)
- Cloruro de Sodio($NaCl$)
- EDTA
- Negro de ericromo
- Carbonato de Calcio ($CaCO_3$)
- Ácido Clorhídrico(HCl)
- Cloruro de Amonio(NH_4Cl)
- Hidróxido de Amonio(NH_4OH)
- Cloruro de Magnesio($MgCl_2 \cdot 6H_2O$)
- Acetato de Sodio($CH_3COONa \cdot 3H_2O$)
- Nitrato de Potasio(KNO_3)
- Sulfato de sodio(Na_2SO_4)
- Ácido Acético (99%) (CH_3COOH)
- Sulfato de Sodio anhidro
- Ácido sulfúrico(H_2SO_4)
- Carbonato de Sodio(Na_2CO_3)
- Cloruro de Bario ($BaCl_2$)

Materiales, instrumentos y equipos utilizados durante la experimentación

Figura N° 4.2 Materiales de vidrio



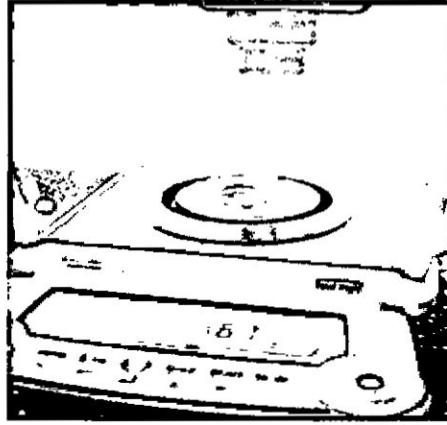
Fuente: [Elaboración propia. 2017]

Figura N°4.3 Turbidímetro



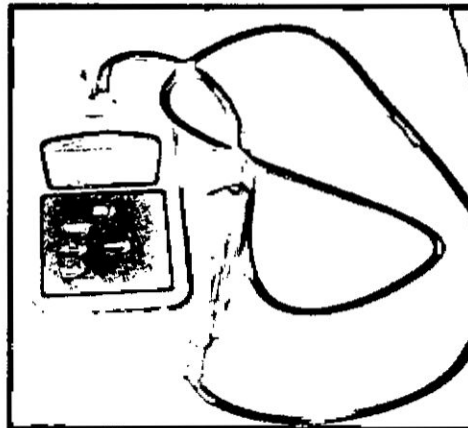
Fuente: [Elaboración propia. 2017]

Figura N°4.4 Balanza electronica



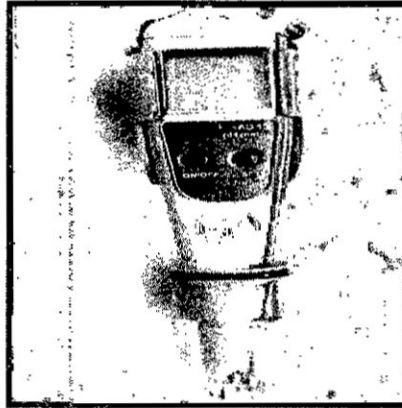
Fuente: [Elaboración propia. 2017]

Figura N° 4.5 Conductímetro ADWA AD 330



Fuente: [Elaboración propia. 2017]

Figura N°4.6 PH metro ADWA



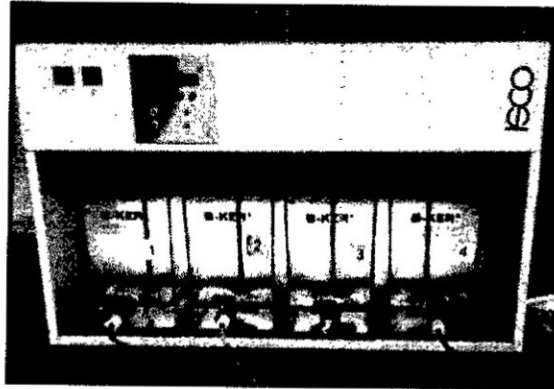
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Figura N°4.7 Fuente de Poder



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Figura N°4.8 Test de Jarras B-KER



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Figura N°4.9 Agitador Magnetico MODEL 85



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

4.5. Procedimiento de recolección de datos

4.5.1. Etapa inicial de investigación.

a. Determinación de los óptimos de los reactivos que se utilizaron para la precipitación química.

Se realizó la prueba de test de jarras para la determinar las cantidades óptimas de reactivos para la precipitación de Ca^{+2} Mg^{+2} y SO_4^{-2} que se encontraban en el agua de regeneración de resinas de intercambio iónico.

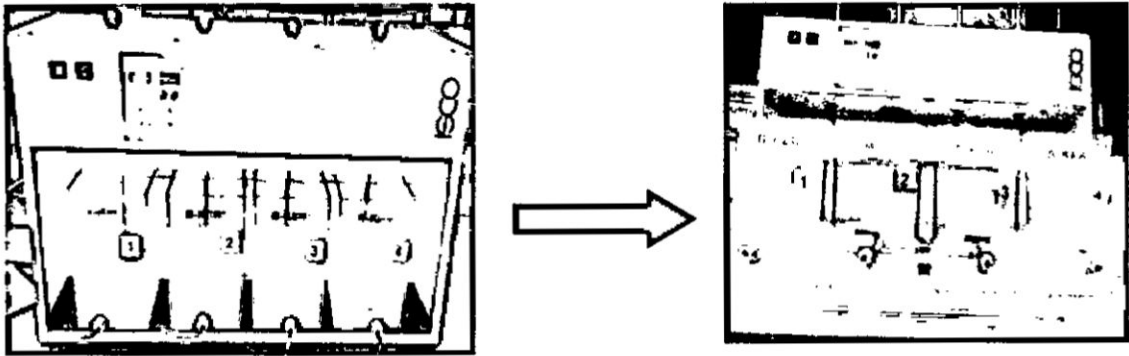
- Se pesó Na_2CO_3 , NaOH y BaCl_2 en un volumen de 500 mL, los cuales fueron agregados al test de jarras durante un periodo de 10 min, luego se dejó precipitar por 30 minutos.

Figura N°4.10 Pesaje de reactivos utilizados en el test de jarras



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

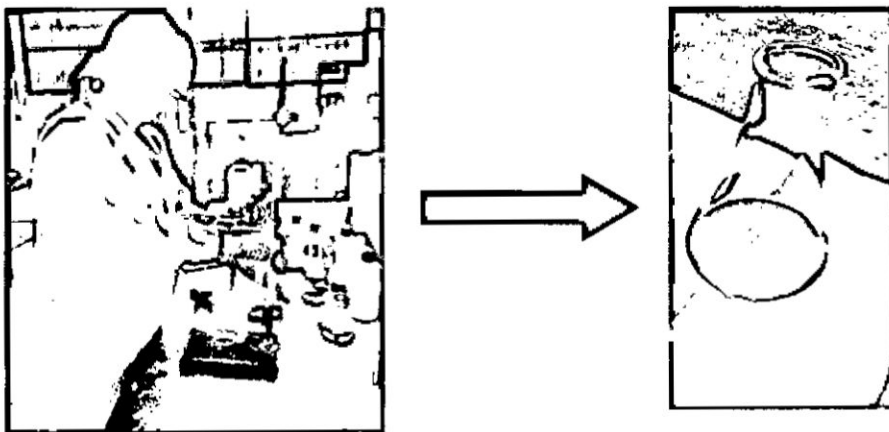
Figura N°4.11 Precipitación de Ca^{+2} , Mg^{+2} o SO_4^{-2} en el test de jarras



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

- Se separó el precipitado de la solución, luego se realizó análisis de dureza, sulfatos y cloruros.
- El ensayo de dureza se obtuvo mediante el método titulométrico con EDTA 0,01M y con indicador negro de ericromo. El cual se determina que no existe dureza cuando el color cambia de rosado a azul.

Figura N°4.12 Determinación de dureza



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Las pruebas iniciales fueron realizadas separadas para estimar cuál de los reactivos sea Na_2CO_3 o NaOH genera mayor influencia para disminuir la dureza.

Las pruebas finales se agregaron cantidades diferentes de Na_2CO_3 y NaOH para evaluar la disminución de la dureza hasta llegar a 0 ppm.

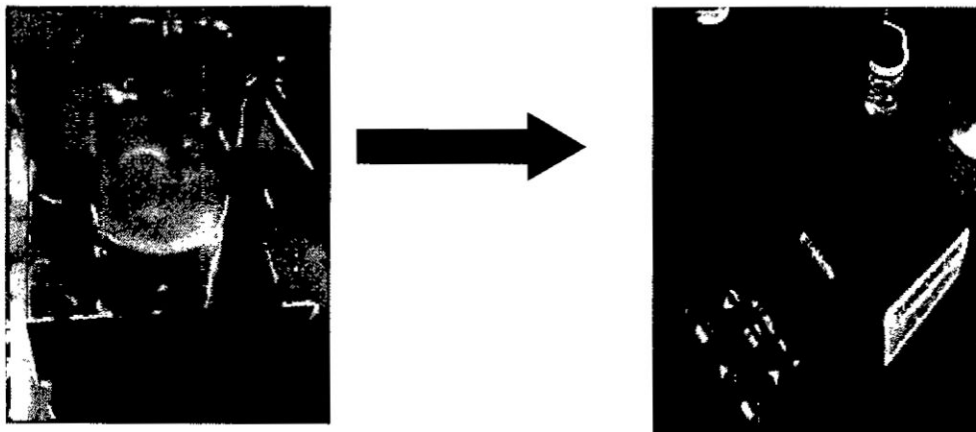
Figura N°4.13 Muestras con = 0 ppm



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

- Se utilizó el método del turbidímetro para determinar la cantidad de sulfatos presentes en la muestra. Los sulfatos se precipitan en medio acético con cloruro de bario.

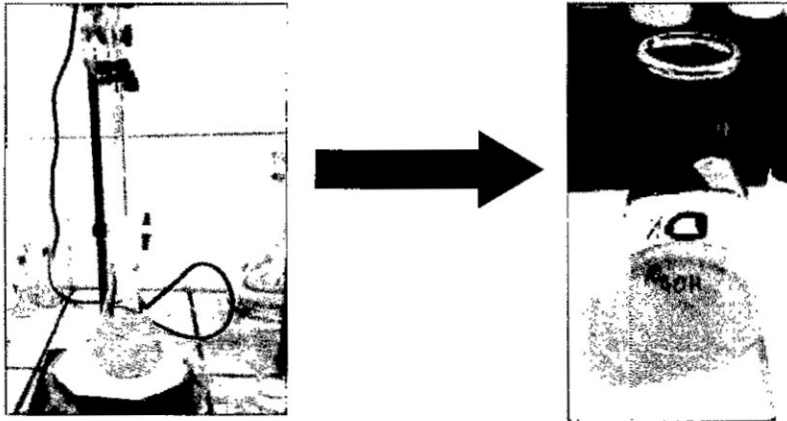
Figura N° 4.14 Análisis de Sulfatos



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

- Se realizó análisis de cloruros presentes en la muestra mediante el método titulométrico con AgNO_3 0,0141 M y con solución indicadora de K_2CrO_4 , hasta que cambie de amarillo a amarillo rosado.

Figura N°4.15 Análisis de Cloruros



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

b. Precipitación química

Se realizó la precipitación química con Na_2CO_3 , NaOH y BaCl_2 para un volumen de 27 L. La precipitación se realizó en un reactor de acrílico que tiene las siguientes dimensiones: Largo=60 cm y D=28 cm. debido a que el material utilizado es resistente al ataque de ácidos y bases.

1. La precipitación del Ca^{+2} con Na_2CO_3 , se separa el precipitado de CaCO_3 y en la solución se forma NaCl .
2. La precipitación del Mg^{+2} con NaOH , se separa el precipitado de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ y se forma NaCl en solución.
3. La precipitación de sulfato es con BaCl_2 , se separa el precipitado BaSO_4 y se forma NaCl en solución.

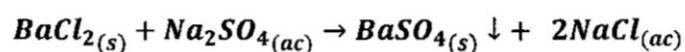
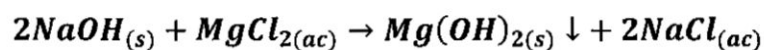
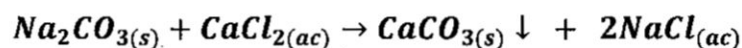
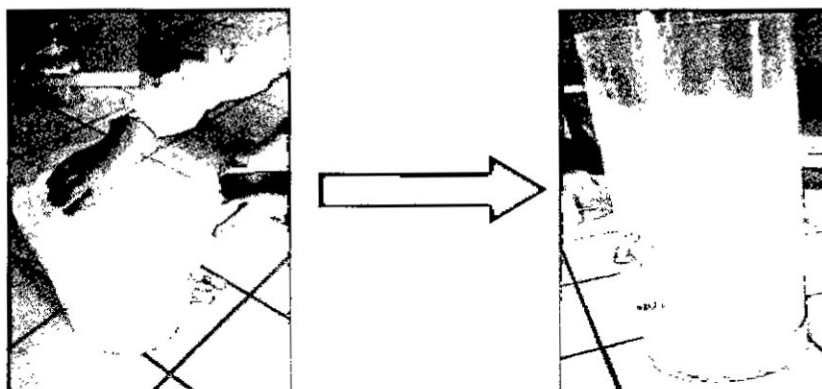


Figura N°4.16 Precipitación de agua de regeneración de resinas de intercambio iónico



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

c. Análisis del Agua tratada

1. Análisis de Dureza, Cloruros y Sulfatos

Se realizó el análisis de laboratorio para la determinación de la concentración de dureza, sulfatos, cloruros y determinación las características fisicoquímicas como conductividad y pH.

2. Análisis Cuantitativo de los óptimos obtenidos en la primera etapa de investigación

Se hizo un análisis cuantitativo para determinar si los valores óptimos daban las características adecuadas de 0ppm de CaCO_3 para su posterior tratamiento en la celda de electrodiálisis.

3. Análisis de alcalinidad

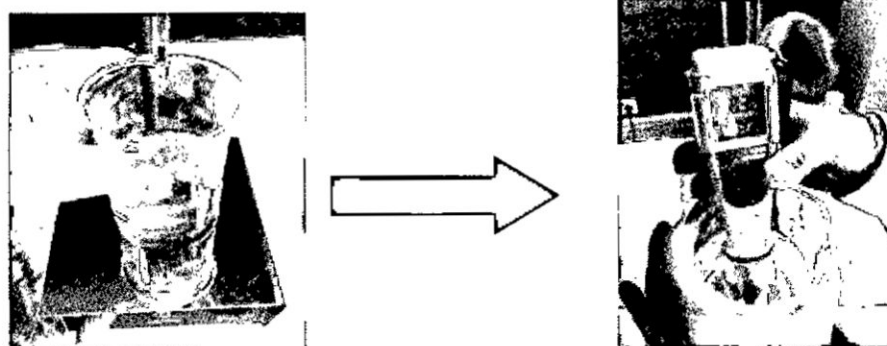
Para determinar el exceso de iones OH^- y $(\text{CO}_3)^{2-}$ presentes en el agua tratada con NaOH y Na_2CO_3 , se analizó con el método de titulación de alcalinidad.

Este método consiste en titular con ácido clorhídrico HCl 0,1 N y agregar fenolftaleína o rojo de metilo como indicador.

- **Determinación de iones OH^-**

Se pipetea 100 mL de muestra agregando fenolftaleína como indicador. luego se titula con ácido hasta llegar a $\text{pH} = 8,3$.

Figura N° 4.17 Análisis de Alcalinidad con fenolftaleína



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

- **Determinación de iones $(\text{CO}_3)^{2-}$**

La muestra analizada con fenolftaleína y con $\text{pH} = 8,3$, se le agrega el indicador rojo de metilo y se le lleva a un $\text{pH} = 4,5$ para determinar carbonatos.

Figura N°4.18 Alcalinidad con rojo de metilo

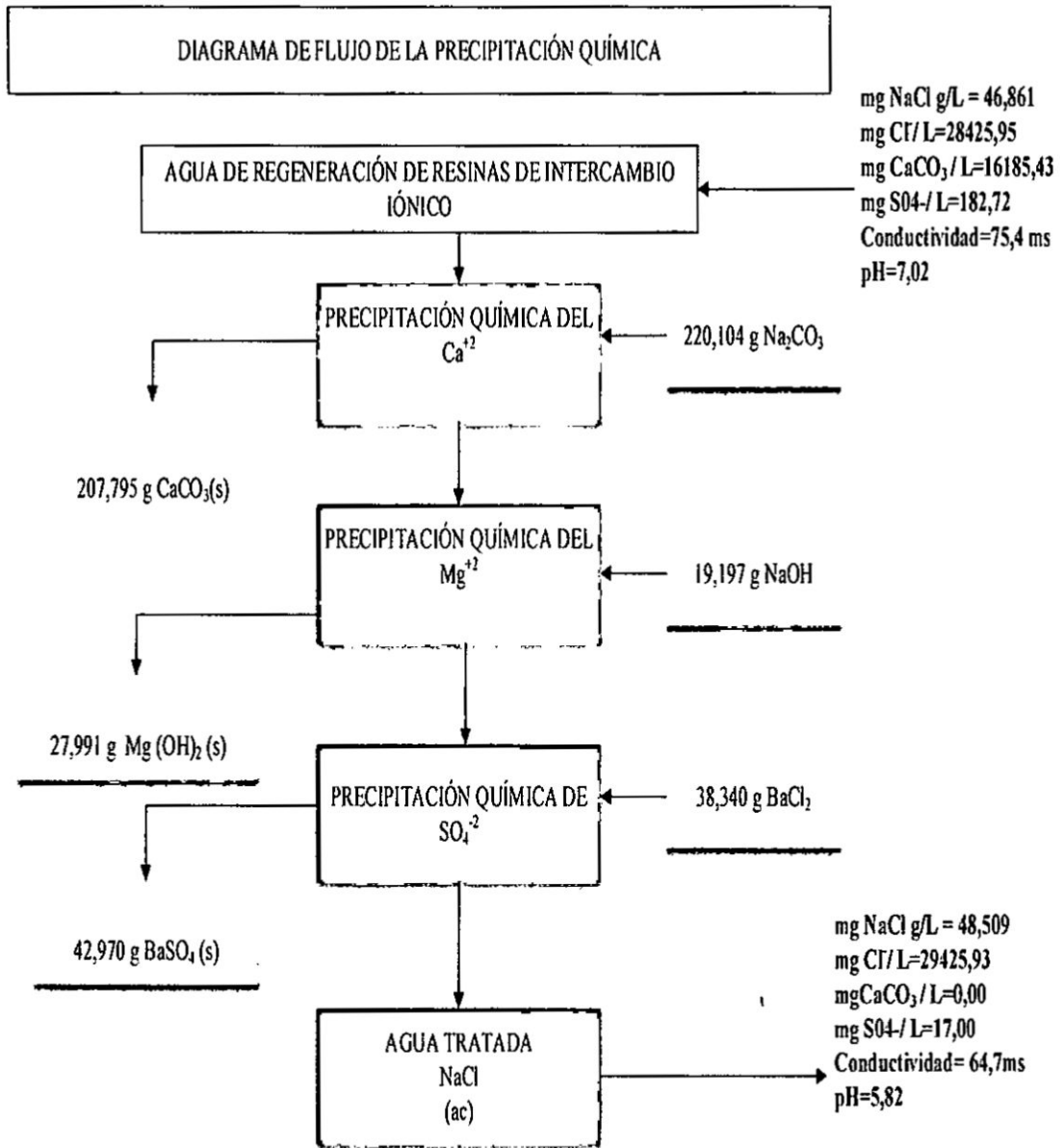


Fuente: [Elaboración propia, 2017]

d. Neutralización con HCl

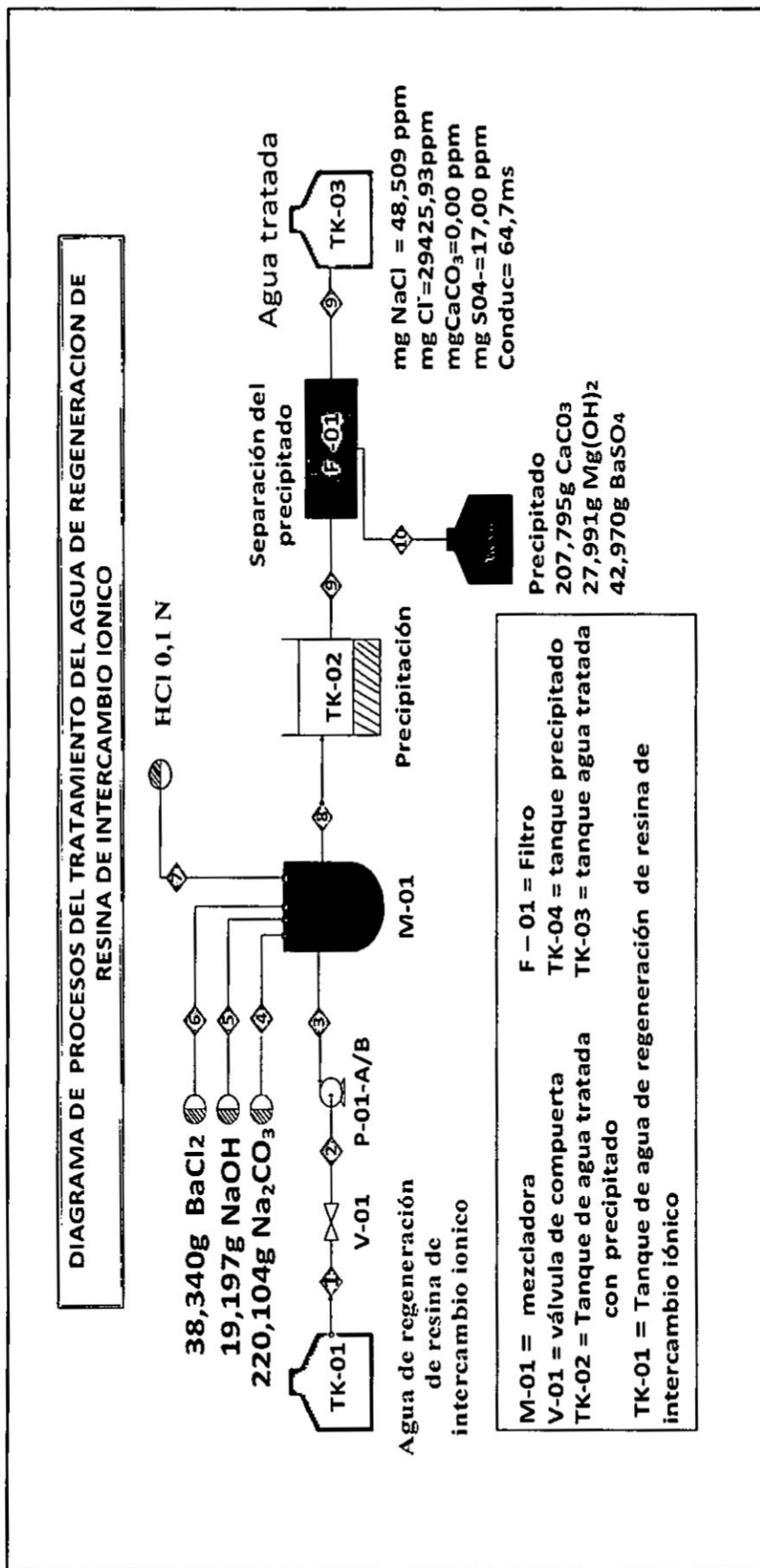
Se realizó la neutralización con HCl para asegurar que el agua no tenga exceso de NaOH y Na_2CO_3 .

Figura N°4.19 Diagrama de flujo de la precipitación química de agua de regeneración de resina



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Figura N°4.20 Diagrama de procesos del tratamiento de agua de regeneración de resinas de intercambio iónico



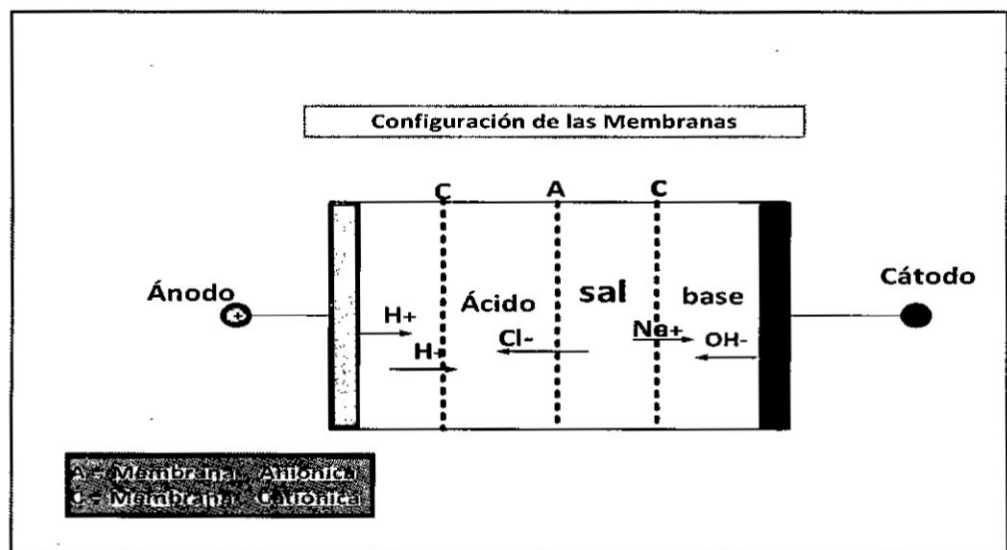
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

4.5.2. Etapa final de Investigación

1. Configuración de la celda de electrodiálisis para obtención de ácido y base.

Se armó la celda de electrodiálisis con la configuración de las membranas en este orden catiónica - aniónica - catiónica para obtener ácido clorhídrico e hidróxido de sodio.

Figura N°4.21 Esquema de la configuración de la celda de electrodiálisis



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

2. Acondicionamiento del equipo de electrodiálisis.

Para darle las condiciones óptimas al equipo de electrodiálisis se lavó con HCl 0,025 N diluido por 30 min para eliminar la dureza presente en las membranas, luego se lava con agua destilada para eliminar el ácido diluido y así comenzar la experimentación.

Figura N°4.22 Equipo de electrodiálisis



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

3. Formación de ácido clorhídrico e hidróxido de sodio

Se realizó ensayos con diferentes concentraciones, voltaje a la entrada de la celda de electrodiálisis.

Figura N° 4.23 Vista lateral del equipo de electrodiálisis

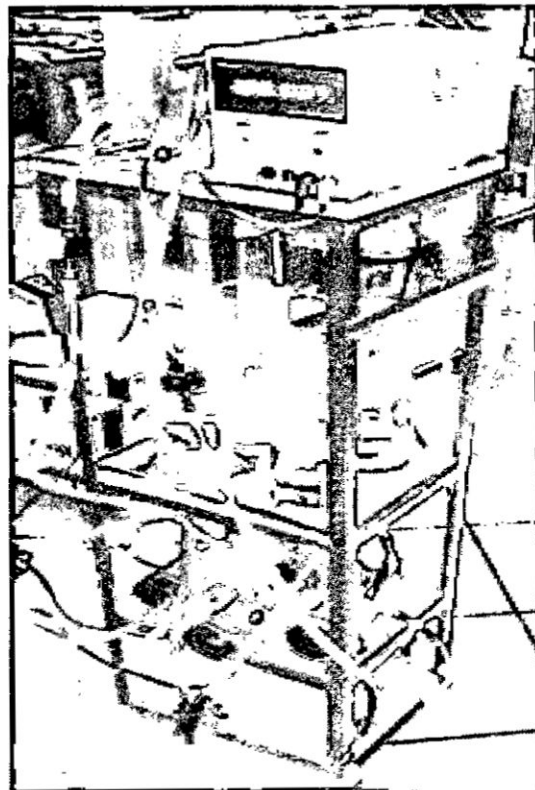


Fuente: [Elaboración propia, 2017]

- Se agregaron 500 mL agua destilada en el tanque del ácido clorhídrico , 500 mL de agua destilada en el tanque hidróxido de sodio, 500 mL ácido sulfúrico a 0,01N diluido para el lavado de los electrodos y 500mL solución de cloruro de sodio de 48,5 g/L y 38,5 g/L con caudales de 800mL/min y 1000mL/min.

- El equipo se pone en marcha por 3,5 horas, poniendo el voltaje determinado para realizar la experimentación por cada 30 min. El voltaje tiene que ser constante y el amperaje debe aumentar mientras aumenta el tiempo.
- Se extrae muestra de ácido clorhídrico, hidróxido de sodio y cloruro de sodio diluido para realizar los análisis respectivos.

Figura N° 4.24 Equipo de electrodiálisis en marcha



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

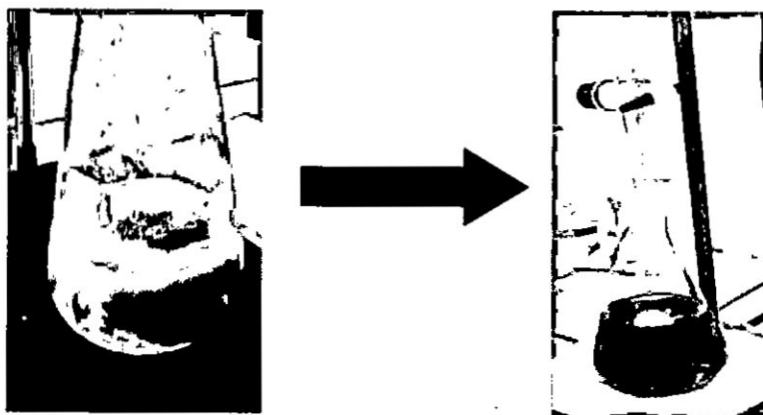
4. Análisis de soluciones obtenidas después de cada 30 min.

Se analizó las concentraciones de ácido y base obtenida por método de titulación y para el cloruro de sodio se analiza con método colorimétrico de cloruros. También se mide el pH y la conductividad de cada muestra. Se utilizó un mililitro de cada solución para realizar los análisis.

a. Análisis del ácido por titulación con el indicador fenolftaleína.

Se pipetea 1 mL de ácido obtenido y se agrega una gota de fenolftaleína, el color del ácido no cambia al agregar fenolftaleína, luego se titula con hidróxido de sodio 0,025 N. Cuando el ácido vira de transparente a rosado se da por finalizada la titulación y se anota el volumen gastado de la base para encontrar la concentración del ácido clorhídrico.

Figura N° 4.25 Titulación del ácido con fenolftaleína

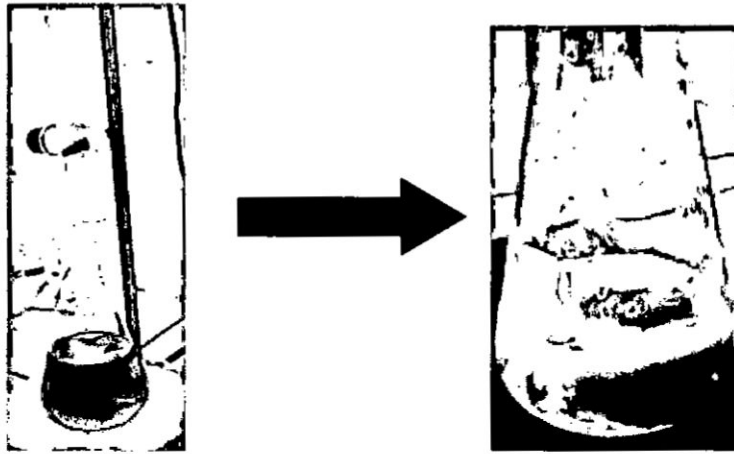


[Elaboración propia 2017]

b. Análisis del hidróxido de sodio por titulación con el indicador fenolftaleína.

Se pipetea 1 mL del hidróxido de sodio obtenido y se agrega una gota de fenolftaleína, luego se titula con ácido clorhídrico 0,0125 N. Cuando la base vira de un color rosa a transparente se da por finalizada la titulación y se anota el volumen gastado del ácido para encontrar la concentración del hidróxido de sodio.

Figura N°4.26 Titulación del hidróxido de sodio con fenolftaleína

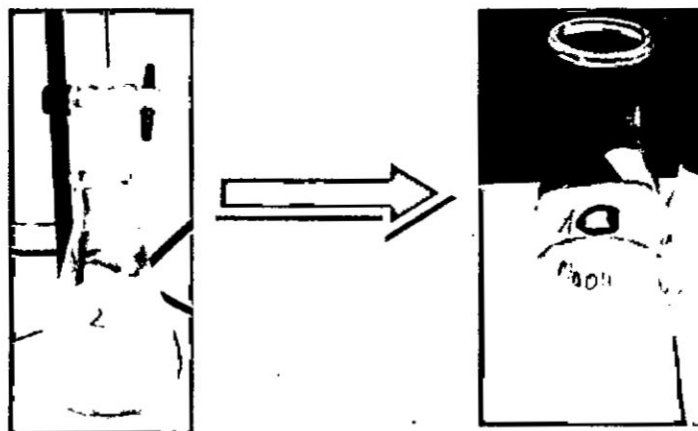


[Elaboración propia, 2017]

c. Análisis del cloruro de sodio por el método colorimétrico de cloruros.

Se pipetea 1 mL del cloruro de sodio diluido y se agrega 1 mL de dicromato de potasio formando una solución de color amarilla, luego se titula con nitrato de plata. Cuando la solución cambia de color amarillo a color amarillo rosado se anota el volumen gastado del nitrato de plata para encontrar la concentración del cloruro de sodio.

Figura N°4.27 Análisis de Cloruro de sodio



[Elaboración propia, 2017]

d. Medición de la conductividad

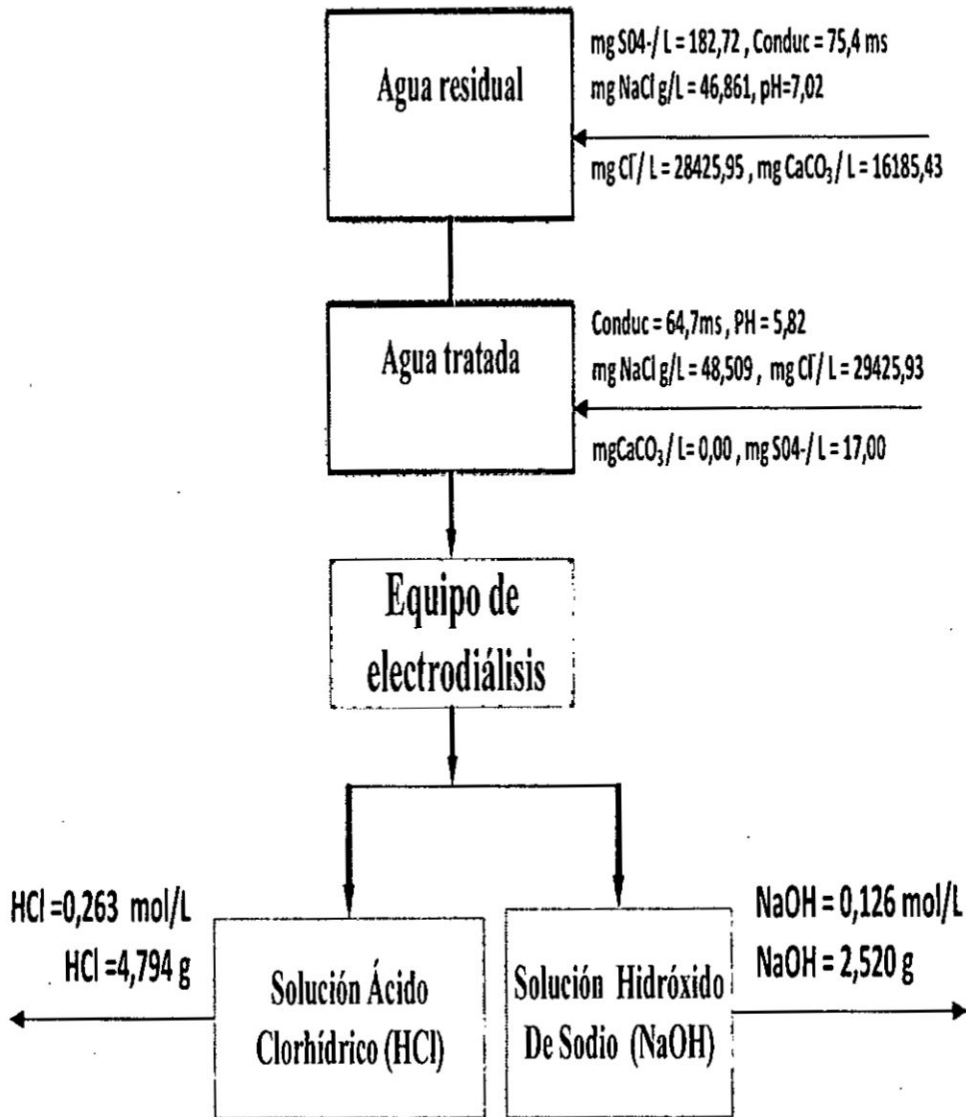
1. La conductividad de la base y ácido comienza a aumentar de acuerdo al tiempo de experimentación.
2. La conductividad del cloruro de sodio disminuye mientras pasa el tiempo de experimentación.

e. Medición del pH de las 4 soluciones

1. El pH en la base aumentó de acuerdo al tiempo de experimentación, la base debe estar en un pH mayor que 7 y menor o igual que 14.
2. El pH en el ácido clorhídrico disminuye de acuerdo al tiempo de experimentación, el ácido debe estar en un pH menor que 7 y mayor que cero.
3. El pH del cloruro de sodio aumenta.

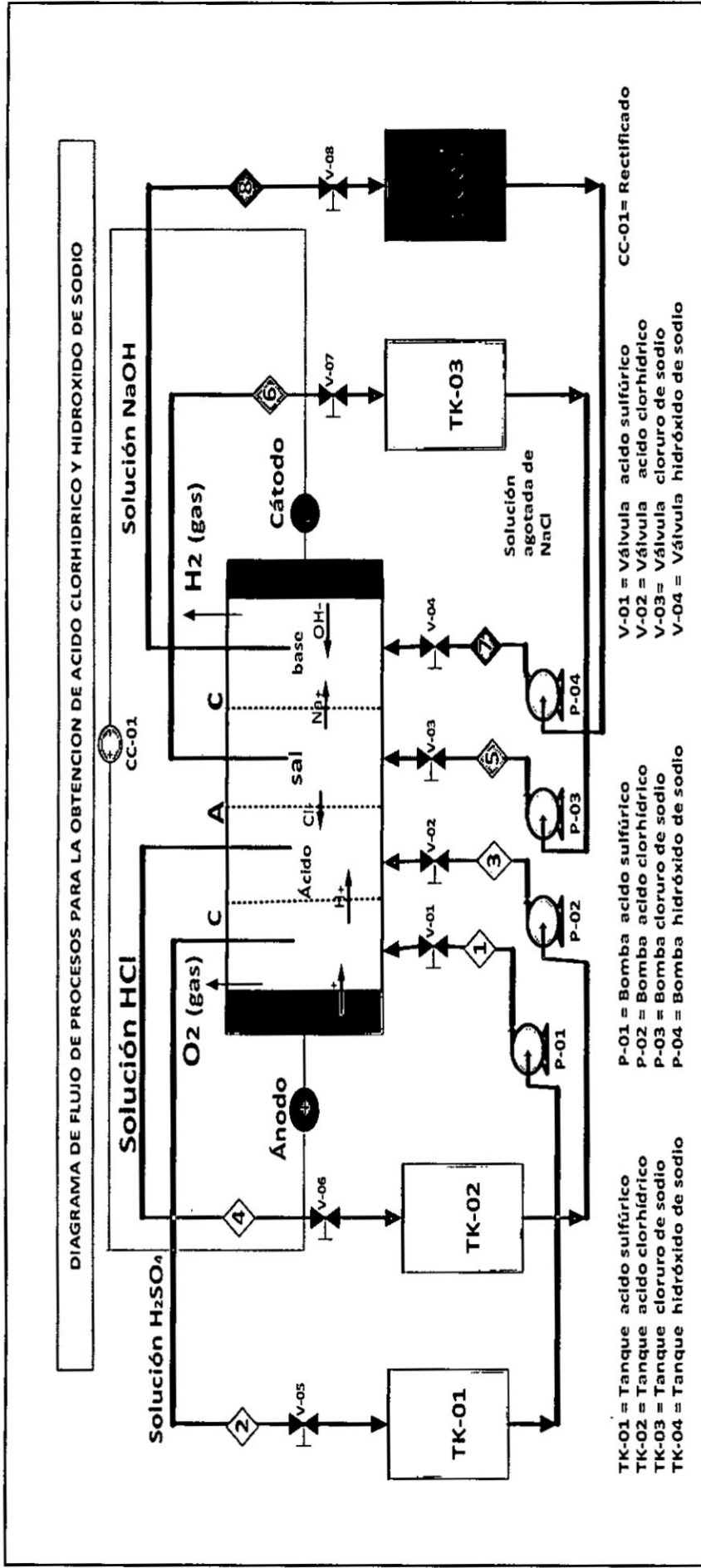
Figura N°4.28 Diagrama de flujo de la obtención de ácido y base

DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA OBTENCION DE ACIDO CLORHÍDRICO E HIDRÓXIDO DE SODIO



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Figura N°4.29 Diagrama de proceso para la obtención de ácido y base



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

4.6. Procedimiento estadístico y análisis de datos

En el proceso de análisis se definieron variables y niveles para su interpretación:

Tabla N°4.1 Variables y niveles de investigación

N°	Variables	Notación	Nivel Bajo	Nivel alto
1	Caudal de alimentación de NaCl en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico	X1	-	+
2	Concentración de NaCl en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las agua de regeneración de resinas de intercambio iónico	X2	-	+
3	Voltaje en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las agua de regeneración de resinas de intercambio iónico	X3	-	+

Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Las fuentes teóricas y el análisis respecto a la influencia de parámetros en la electrodiálisis permitieron mejorar resultados obtenidos dando respaldo desde la apreciación empírica.

Entonces bajo ese planteamiento los niveles de estudio elegidos son:

Tabla N° 4.2 Caracterización de los 3 niveles de experimentación

Niveles	Caudal de NaCl (mL/min)	[NaCl] (g/L)	Voltaje (V)
Bajo	800	38,5	7
Alto	1000	48,5	10

[Elaboración propia, 2017]

Empleando el método de diseño factorial con 2 niveles y 3 variables el cual se nos da como resultado 8 experimentos.

Arreglo de pruebas experimentales, se realizarían 8 experimentos:

Debido a que la formación de HCl e NaOH es simultánea las condiciones de las pruebas experimentales son las mismas:

Tabla N°4.3 Configuración de las pruebas para la experimental del HCl e NaOH

N° experimentos	Voltaje (V)	[NaCl] (Mol/L)	Caudal de NaCl (mL/min)
1	7	38,5	800
2	10	38,5	800
3	7	48,5	800
4	10	48,5	800
5	7	38,5	1000
6	10	38,5	1000
7	7	48,5	1000
8	10	48,5	1000

[Elaboración propia, 2017]

Para todas las muestras se utilizó un tiempo de experimentación de 3,5 horas.

4.6.1. Estrategia de análisis estadístico

Obtenidos los valores de cada experimentación se proseguirá con:

- Exploración de las variables y creación de variables transformadas o derivadas
- Análisis simple de relación
- Descripción de las variables
- Planteamiento de un modelo matemático
- Planteamiento de conclusiones

4.6.2. Plan de Interrelación de Variables

En la presente investigación se utilizó el Software Minitab 2017 en el procesamiento de datos experimentales de los ensayos obtención de ácido clorhídrico e hidróxido de sodio del agua de regeneración de resina de intercambio iónico, durante un tiempo 3,5 horas.

Con Minitab se validó la hipótesis o se rechazó.

Se utiliza diseño factorial se encuentra la ecuación que rige a la obtención de ácido y base mediante las variables que afectan.

Ecuación del HCl:

$$Y_1 = Y_{01} + BX_3 + CX_2 + D X_1 - E X_3 * X_2 - F X_3 * X_1 - K X_2 * X_1 + M X_3 * X_2 * X_1$$

Y_{01} : Concentración inicial del ácido clorhídrico HCl

B, C, D, E, F, K, M coeficientes de ajuste de ecuación

X_1 = Caudal de alimentación de NaCl

X_2 = Concentración de alimentación NaCl

X_3 = Voltaje

Y_1 = Concentración HCl

Ecuación del NaOH:

$$Y_2 = Y_{02} + R X_3 + S X_2 + T X_1 - U X_3 * X_2 - P X_3 * X_1 - Q X_2 * X_1 + Z X_3 * X_2 * X_1$$

Y_{02} : Concentración inicial del ácido clorhídrico NaOH,

R, S, T, U, P, Q, Z coeficientes de ajuste de ecuación

X_1 = Caudal de alimentación de NaCl

X_2 = Concentración de alimentación NaCl

$X_3 = \text{Voltaje}$

$Y_2 = \text{Concentración NaOH}$

El ajuste lineal nos permitirá obtener un modelo matemático con el cual podremos posteriormente proyectar el desempeño de la concentración obtenida de ácido y base.

En Minitab se utilizó el diseño factorial, la superficie de respuesta y el contorno de respuesta.

V. RESULTADOS

5.1. Resultados de análisis de dureza, cloruros y sulfatos

En las siguientes tablas se detalla los resultados de dureza y cloruros de la primera muestra evaluada en el test de jarras.

Tabla N° 5.1 (g/L) Na_2CO_3 vs Dureza y Cloruros de la primera muestra

Orden-Ítem de muestra	Resultado NaCO_3 g /L	Resultado Cl^- mg/ L	Resultado CaCO_3 mg/ L
M inicial	0,00	5237,85	5594,96
Ensayo 1	1,80	5237,85	5195,32
Ensayo 2	2,00	5237,85	4196,22
Ensayo 3	2,20	5237,85	3996,40
Ensayo 4	2,40	5237,85	3796,58

[Elaboración propia, 2017]

Tabla N° 5.2 (g/L) NaOH vs Dureza y Cloruros de la primera muestra 1

Orden-Ítem de Muestra	Resultado NaOH g/L	Resultado Cl^- mg/ L	Resultado CaCO_3 mg/ L
M inicial	0,00	5237,85	5594,96
Ensayo 1	1,00	5451,64	4196,22
Ensayo 2	1,40	5344,74	3996,40
Ensayo 3	1,80	4703,37	3796,58
Ensayo 4	2,20	5451,64	4196,22

Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Tabla N° 5.3 (g/L) BaCl₂ vs Dureza y Cloruros de la primera muestra

Orden-Ítem de muestra	Resultado BaCl₂ g/L	Resultado Cl⁻ mg/ L	Resultado CaCO₃ mg/ L
M inicial	0,00	5237,85	5594,96
Ensayo 1	1,60	5665,43	5994,60
Ensayo 2	2,00	5772,32	5794,78
Ensayo 3	2,40	5665,43	6394,25
Ensayo 4	2,80	5772,32	4595,86

Fuente: [Elaboración propia, 2017]

En las siguientes tablas se detalla los resultados de dureza y cloruros de la segunda muestra evaluada en el test de jarras.

Tabla N° 5.4 (g/L) Na₂CO₃ vs Dureza y Cloruros de la segunda muestra

Orden-Ítem de muestra	Resultado NaCO₃ g/L	Resultado Cl⁻ mg/ L	Resultado CaCO₃ mg/ L
M inicial	0,00	5237,85	9646,49
Ensayo 1	2,30	5344,74	4396,04
Ensayo 2	2,36	5130,95	4396,04
Ensayo 3	2,72	5344,74	3796,58
Ensayo 4	2,76	5344,74	3996,40
Ensayo 5	3,87	5558,53	3796,58
Ensayo 6	5,17	5237,85	3596,76

Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Tabla N° 5.5 (g/L) NaOH vs Dureza y Cloruros de la segunda muestra

Orden-Ítem de muestra	Resultado NaOH g/L	Resultado Cl ⁻ mg/ L	Resultado CaCO ₃ mg/ L
M inicial	0,00	5237,85	9646,49
Ensayo 1	1,40	5665,43	7923,90
Ensayo 2	1,55	5451,64	6890,35
Ensayo 3	1,62	5130,95	6545,83
Ensayo 4	2,70	5665,43	6545,83
Ensayo 5	3,40	5344,74	6545,83
Ensayo 6	4,38	5665,43	6201,32

Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Tabla N° 5.6 (g /L) BaCl₂vs Dureza y Cloruros de la segunda muestra

Orden -Ítem de muestra	Resultado BaCl ₂ g/L	Resultado Cl ⁻ mg/ L	Resultado CaCO ₃ mg/ L
M inicial	0,00	5237,85	9646,49
Ensayo 1	1,60	5344,74	5395,14
Ensayo 2	1,68	5665,43	6993,71
Ensayo 3	2,03	5558,53	7593,17
Ensayo 4	2,20	5772,32	7393,35
Ensayo 5	2,36	5558,53	6194,43
Ensayo 6	2,72	5451,64	5994,60
Ensayo 7	6,12	5879,22	8392,45
Ensayo 8	6,82	6199,90	8592,27

Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Tabla N° 5.7 (g /L) BaCl₂ vs Dureza y Cloruros de la segunda muestra

Resultado Na ₂ CO ₃ g/L	Resultado NaOH g/L	Resultado Cl ⁻ mg/ L	Resultado CaCO ₃ mg/ L
0,00	0,00	7482,64	10390,65
1,00	1,60	6948,16	8256,23
2,00	2,00	6948,16	7992,81
2,60	2,60	6413,69	5594,96
3,20	4,00	6413,69	4595,86
3,20	1,00	6948,16	2397,84
4,00	4,00	6948,16	3796,58
4,00	6,00	6413,69	2597,66
5,00	5,00	6462,23	1598,56
6,00	4,00	6652,30	3396,94
6,00	3,60	6852,17	1198,92
6,20	5,00	6948,16	1798,38
6,40	4,60	6948,16	1198,92
7,00	6,00	6985,12	1538,62
7,00	4,00	7482,64	1458,69
7,40	3,00	7452,64	1079,03
7,80	6,00	7482,64	599,46
8,40	7,00	8502,52	419,62
9,00	7,00	8017,11	2597,66
9,20	7,40	7482,64	1398,74
9,20	8,00	7521,46	5994,60
9,60	6,60	8551,59	799,28
9,60	7,60	8952,23	33,97

Fuente: [Elaboración propia, 2017]

5.2. Resultados de la precipitación química

En la siguiente tabla se detalla los resultados de dureza, cloruros, sulfatos, conductividad y pH del agua inicial de regeneración de resinas de intercambio iónico.

Tabla N° 5.8 Resultados del análisis del agua de regeneración de resinas

Resultados	
mg Cl ⁻ / L	28425,95
mg CaCO ₃ / L	16185,43
mg S04 ⁻ / L	182,72
Conductividad(ms)	75,4
PH	7,02

Fuente: [Elaboración propia, 2017]

En la siguiente tabla se detalla los óptimos obtenidos después del análisis cuantitativo inicial al agua de regeneración de resinas.

Tabla N° 5.9 Óptimos para precipitar el agua de regeneración de resinas de intercambio iónico

Óptimos	
Na ₂ CO ₃ (g/L)	8,152
NaOH(g/L)	0,711
BaCl ₂ (g/L)	1,422

Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Con los óptimos se realizan los cálculos de la precipitación química

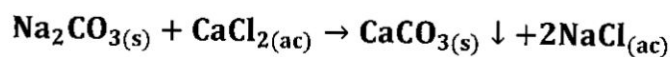
a) **Cálculo de la masa de reactivos para la precipitación en 27 L, con los óptimos obtenidos en la primera etapa de investigación.**

$$\text{masa Na}_2\text{CO}_{3(s)} = 8,152 \frac{\text{g}}{\text{L}} * 27\text{L} = 220,104 \text{ g}$$

$$\text{masa NaOH}_{(s)} = 0,711 \frac{\text{g}}{\text{L}} * 27\text{L} = 19,197\text{g}$$

$$\text{masa BaCl}_{2(s)} = 1,422 \frac{\text{g}}{\text{L}} * 27\text{L} = 38,340\text{g}$$

▪ **Cálculo de las masas obtenidas de $\text{CaCO}_{3(s)}$ y $\text{NaCl}_{(ac)}$.**



Pesos Moleculares:

$$\overline{M}\text{Na}_2\text{CO}_{3(s)} = 105,988 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

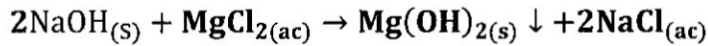
$$\overline{M}\text{NaCl}_{(ac)} = 58,440 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\overline{M}\text{CaCO}_{3(s)} = 100,090 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\text{masa CaCO}_{3(s)} = 220,104 \text{ gNa}_2\text{CO}_3 * \frac{100,09\text{gCaCO}_3}{105,988\text{gNa}_2\text{CO}_3} = 207,795\text{g}$$

$$\text{masa NaCl}_{(s)} = 220,104 \text{ gNa}_2\text{CO}_3 * \frac{2 * 58,44\text{gNaCl}}{105,988\text{gNa}_2\text{CO}_3} = 242,723\text{g}$$

- **Cálculo de las masas obtenidas de $\text{Mg(OH)}_{2(s)}$ y $\text{NaCl}_{(s)}$**



Pesos Moleculares:

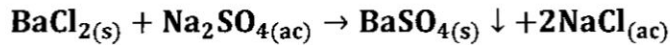
$$\overline{M}\text{NaOH}_{(s)} = 39,997 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\overline{M}\text{Mg(OH)}_{2(s)} = 58,319 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\text{masa Mg(OH)}_{2(s)} = 19,197\text{gNaOH} * \frac{58,319\text{gMg(OH)}_2}{39,997\text{gNaOH}} = 27,991\text{g}$$

$$\text{masa NaCl}_{(s)} = 19,197\text{gNaOH} * \frac{58,44\text{gNaCl}}{39,997\text{gNaOH}} = 28,049\text{g}$$

- **Cálculo de las masas obtenidas $\text{BaSO}_{4(s)}$ y $2\text{NaCl}_{(ac)}$**



Pesos Moleculares:

$$\overline{M}\text{BaSO}_{4(s)} = 233,380 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\overline{M}\text{BaCl}_{2(s)} = 208,230 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\text{masa BaSO}_{4(s)} = 38,340\text{gBaCl}_2 * \frac{233,38 \text{ gBaSO}_4}{208,230\text{gBaCl}_2} = 42,970\text{g}$$

$$\text{masa NaCl}_{(ac)} = 38,340\text{gBaCl}_2 * \frac{2 * 58,44\text{gNaCl}}{208,230\text{gBaCl}_2} = 21,520\text{g}$$

$$\text{masa NaCl}_{(s)} \text{ total} = 21,520\text{g} + 28,049\text{g} + 242,723\text{g} = 292,292\text{g}$$

$$\frac{\text{masaNaCl}_{(s)}}{\text{Volumen}} = \frac{292,292\text{g}}{27 \text{ L}} = 10,826 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

b) Cálculo de la alcalinidad en la muestra

Neutralización con HCl del exceso de $\text{NaOH}_{(s)}$ e $\text{Na}_2\text{CO}_{3(s)}$.

Fenolftaleína pH=8,3

P=110,045ppm

Naranja de metilo pH=4,5

T=89,978ppm

- **Cálculo de $\text{NaOH}_{(s)}$ y $\text{Na}_2\text{CO}_{3(s)}$ en exceso durante la precipitación química.**

$$(\text{NaOH}_{(s)}) \text{ como } \text{CaCO}_{3(s)} = 2 * P - T = 130,112 \frac{\text{mgCaCO}_{3(s)}}{\text{L}}$$

$$(\text{Na}_2\text{CO}_{3(s)}) \text{ como } \text{CaCO}_{3(s)} = 2 * (P - T) = 40,134 \frac{\text{mgCaCO}_{3(s)}}{\text{L}}$$

$$\begin{aligned} \text{NaOH}_{(s)} \text{ exceso} &= 130,112 \frac{\text{mgCaCO}_{3(s)}}{\text{L}} * \frac{39,997\text{g NaOH}_{(s)}}{100,090\text{gCaCO}_{3(s)}} \\ &= 0,052 \frac{\text{gNaOH}_{(s)}}{\text{L}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Na}_2\text{CO}_{3(s)} \text{ exceso} &= 40,134 \frac{\text{mgCaCO}_{3(s)}}{\text{L}} * \frac{105,988\text{gNa}_2\text{CO}_{3(s)}}{100,090\text{gCaCO}_{3(s)}} \\ &= 0,042 \frac{\text{gNa}_2\text{CO}_{3(s)}}{\text{L}} \end{aligned}$$

- **Cálculo de NaOH e Na₂CO₃ utilizado para tratar nuestra agua de regeneración de resinas de intercambio iónico.**

$$\frac{\text{masa Na}_2\text{CO}_3(s)}{V} = 8,152 \frac{\text{gNa}_2\text{CO}_3(s)}{L} - 0,042 \frac{\text{gNa}_2\text{CO}_3(s)}{L}$$

$$\frac{\text{masa Na}_2\text{CO}_3(s)}{V} = 8,110 \frac{\text{gNa}_2\text{CO}_3(s)}{L}$$

$$\frac{\text{masa NaOH}(s)}{V} = 0,711 \frac{\text{gNaOH}(s)}{L} - 0,052 \frac{\text{gNaOH}(s)}{L}$$

$$\frac{\text{masa NaOH}(s)}{V} = 0,659 \frac{\text{gNaOH}(s)}{L}$$

- **Cálculo de NaCl real luego de la eliminación del exceso de carbonato de sodio y soda.**

$$\frac{\text{masa NaCl}(s)_{\text{rx1}}}{V} = 8,110 \frac{\text{gNa}_2\text{CO}_3(s)}{L} * \frac{2 * 58,44\text{gNaCl}(s)}{105,988\text{gNa}_2\text{CO}_3(s)} = 8,943 \frac{\text{g}}{L}$$

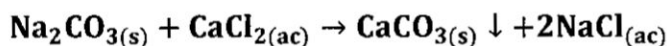
$$\frac{\text{masa NaCl}(s)_{\text{rx2}}}{V} = 0,659 \frac{\text{gNaOH}(s)}{L} * \frac{58,44\text{gNaCl}(s)}{39,997\text{gNaOH}} = 0,963 \frac{\text{g}}{L}$$

$$\frac{\text{masa NaCl}(s)_{\text{rx3}}}{V} = 1,422 \frac{\text{gBaCl}_2(s)}{L} * \frac{2 * 58,44\text{gNaCl}(s)}{208,230\text{gBaCl}_2(s)} = 0,798 \frac{\text{g}}{L}$$

$$\frac{\text{masa NaCl}(s)_{\text{reacciona}}}{V} = 10,704 \frac{\text{g}}{L}$$

c) Cálculos reales de precipitados luego de eliminar el exceso de carbonato de sodio y soda.

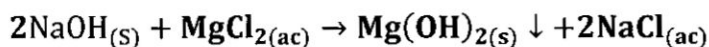
- Cálculo de $\text{CaCO}_{3(s)}$ y $\text{NaCl}_{(ac)}$ real luego de la eliminación del exceso de carbonato de sodio y soda.



$$\text{masa CaCO}_{3(s)} = 8,110 \frac{\text{gNa}_2\text{CO}_{3(s)}}{\text{L}} * 27\text{L} * \frac{100,09\text{gCaCO}_{3(s)}}{105,988\text{gNa}_2\text{CO}_{3(s)}} = 206,784\text{g}$$

$$\text{masa NaCl}_{(s)} = 8,110 \frac{\text{gNa}_2\text{CO}_{3(s)}}{\text{L}} * 27\text{L} * \frac{2 * 58,44\text{gNaCl}_{(s)}}{105,988\text{gNa}_2\text{CO}_{3(s)}} = 241,472\text{g}$$

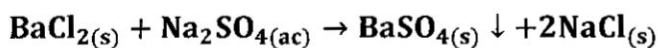
- Cálculo de $\text{Mg}(\text{OH})_{2(s)}$ y $\text{NaCl}_{(ac)}$ real luego de la eliminación del exceso de carbonato de sodio y soda.



$$\text{masa Mg}(\text{OH})_2 = 0,659 \frac{\text{gNaOH}}{\text{L}} * 27\text{L} * \frac{58,319\text{gMg}(\text{OH})_2}{39,997\text{gNaOH}} = 25,944\text{g}$$

$$\text{masa NaCl}_{(s)} = 0,659 \frac{\text{gNaOH}_{(s)}}{\text{L}} * 27\text{L} * \frac{58,44\text{gNaCl}_{(s)}}{39,997\text{gNaOH}_{(s)}} = 25,996\text{g}$$

- Cálculo de la masas obtenidas de $\text{BaSO}_{4(s)}$ y $\text{NaCl}_{(s)}$



$$\text{masa BaSO}_{4(s)} = 38,340\text{gBaCl}_{2(s)} * \frac{233,38 \text{gBaSO}_{4(s)}}{208,230\text{gBaCl}_{2(s)}} = 42,970\text{g}$$

$$\text{masa NaCl}_{(ac)} = 38,340\text{gBaCl}_2 * \frac{2 * 58,44\text{gNaCl}_{(s)}}{208,230\text{gBaCl}_{2(s)}} = 21,520\text{g}$$

En la siguiente tabla se detalla los resultados de dureza, cloruros, sulfatos, conductividad y pH del agua después de la precipitación.

Tabla N° 5.10 Resultados después de la precipitación química

Resultados	
mg Cl/ L	29425,93
mg CaCO₃/ L	0
mg S04-/ L	17,00
Conductividad(ms)	64,7
Ph	5,82

Fuente: [Elaboración propia, 2017]

En la siguiente tabla se detalla los resultados de alcalinidad del agua después de la precipitación química.

Tabla N° 5.11 Análisis de alcalinidad después de la precipitación química

Resultados de Alcalinidad	ResultadosCaCO₃ (mg / L)
NaOH	130,112
Na ₂ CO ₃	40,134

Fuente: [Elaboración propia, 2017]

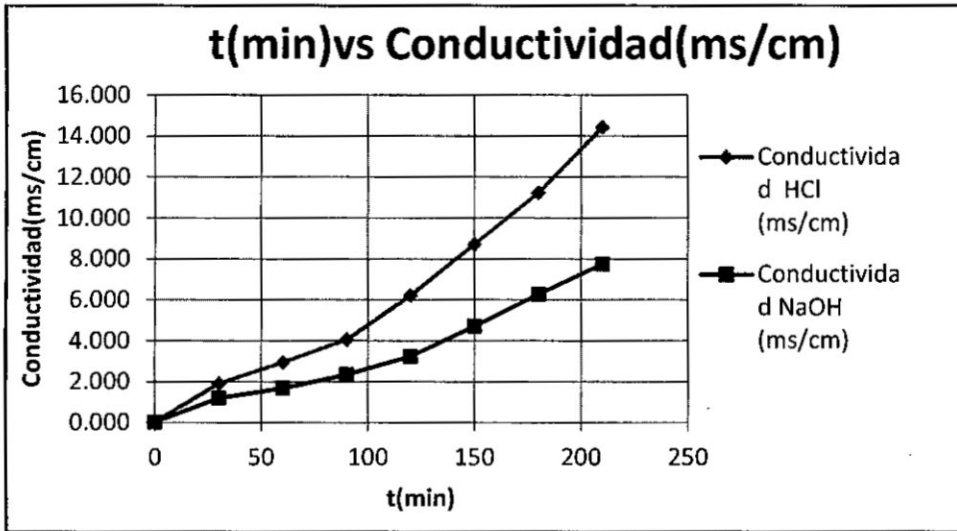
5.3. Resultados de conductividad, pH y concentración de los 8 experimentos durante la obtención de HCl e NaOH.
 Experimento N°1: Q=800mL/min ,7V y 38,5 g/l

Tabla N° 5.12 Resultados de concentración, conductividad y pH de HCl, NaOH y NaCl del experimento N°1

	tiempo (min)	0	30	60	90	120	150	180	210
HCl	Conductividad (ms)	0,027	1,920	2,950	4,070	6,210	8,720	11,240	14,420
	PH	6,760	2,440	2,180	2,090	1,830	1,530	1,520	1,500
	Concentración (M)	0,000	0,011	0,018	0,018	0,021	0,036	0,043	0,061
NaOH	Conductividad (ms)	0,027	1,201	1,671	2,350	3,240	4,720	6,280	7,760
	PH	6,760	11,080	11,410	11,530	11,520	11,730	11,960	11,980
	Concentración(M)	0,000	0,006	0,008	0,009	0,011	0,014	0,019	0,026
NaCl	Conductividad (ms)	45,400	42,700	41,900	41,800	41,300	40,900	39,700	39,600
	PH	6,130	7,340	7,850	7,870	7,950	7,860	8,010	8,020
	Concentración(g/L)	38,5	24,757	24,413	24,413	24,069	23,726	23,038	22,694

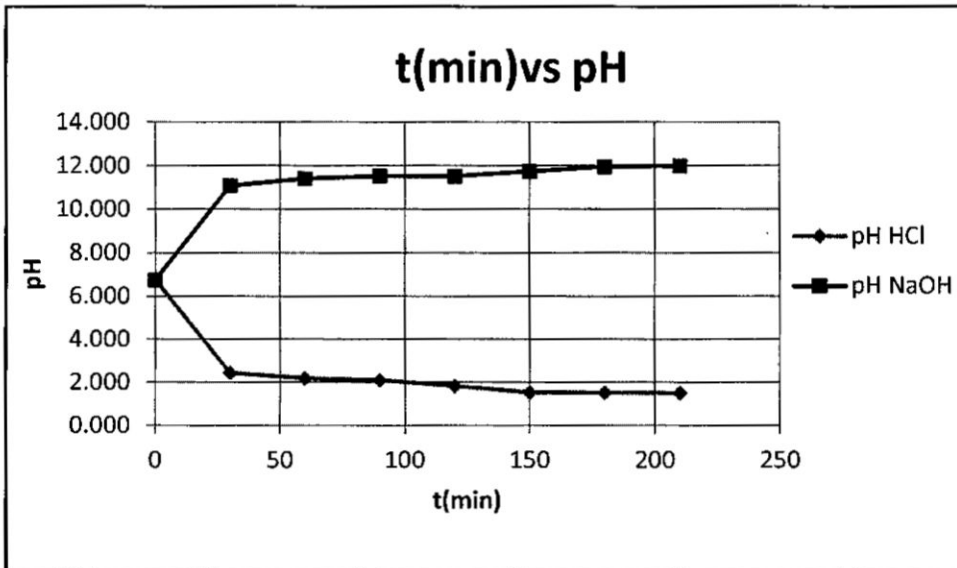
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.1 Tiempo vs Conductividad de HCl e NaOH del experimento N°1



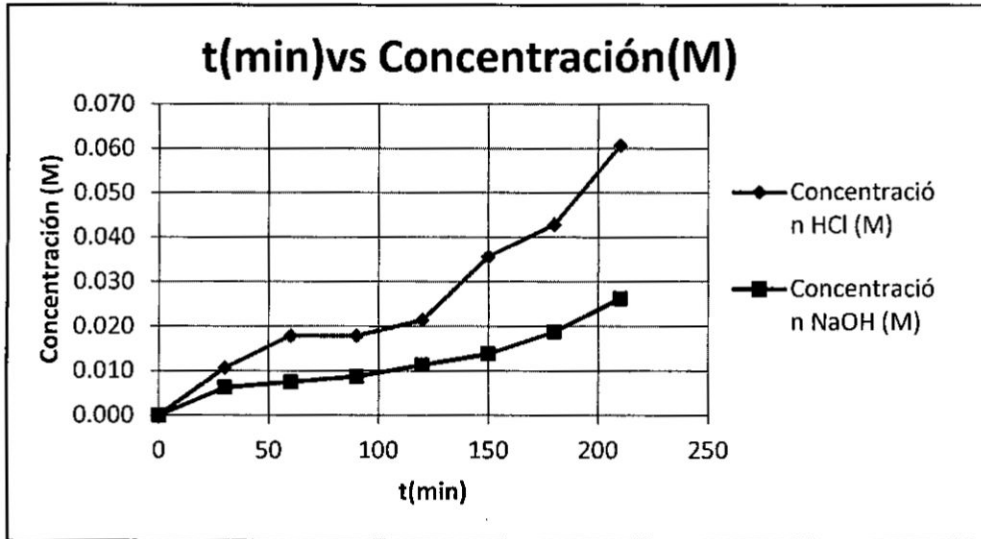
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.2 Tiempo vs pH de HCl e NaOH del experimento N°1



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.3 Tiempo vs Concentración de HCl e NaOH del experimento N°1



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

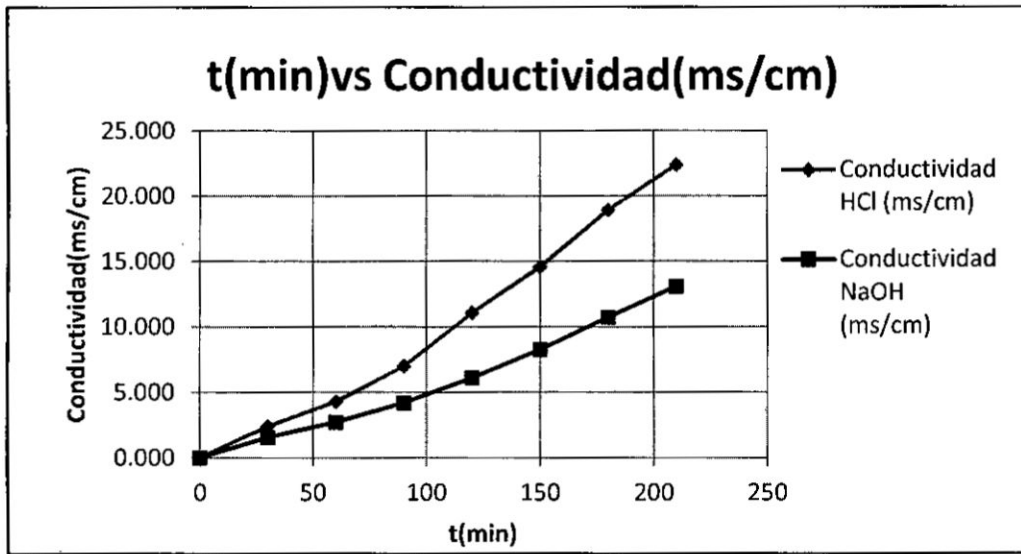
Experimento N°2: Q=800mL/min ,7V y 48,5 g/l

Tabla N° 5.13 Resultados de concentración, conductividad y pH de HCl, NaOH y NaCl del experimento N°2

tiempo (min)		0	30	60	90	120	150	180	210
HCl	Conductividad (ms)	0,027	2,410	4,310	7,010	11,090	14,600	18,950	22,400
	PH	6,760	2,220	2,000	1,900	1,610	1,610	1,380	1,370
	Concentración (M)	0,000	0,011	0,021	0,032	0,046	0,067	0,079	0,104
NaOH	Conductividad (ms)	0,027	1,570	2,750	4,200	6,110	8,280	10,730	13,100
	PH	6,760	11,330	11,680	11,780	11,970	12,020	12,190	12,200
	Concentración(M)	0,000	0,009	0,010	0,011	0,019	0,025	0,044	0,045
NaCl	Conductividad (ms)	55,000	49,100	49,100	48,800	47,100	47,400	46,600	44,700
	PH	6,790	7,830	7,910	7,990	8,120	8,140	8,140	8,070
	Concentración(g/L)	48,5	29,571	28,196	27,852	27,164	26,820	26,476	25,789

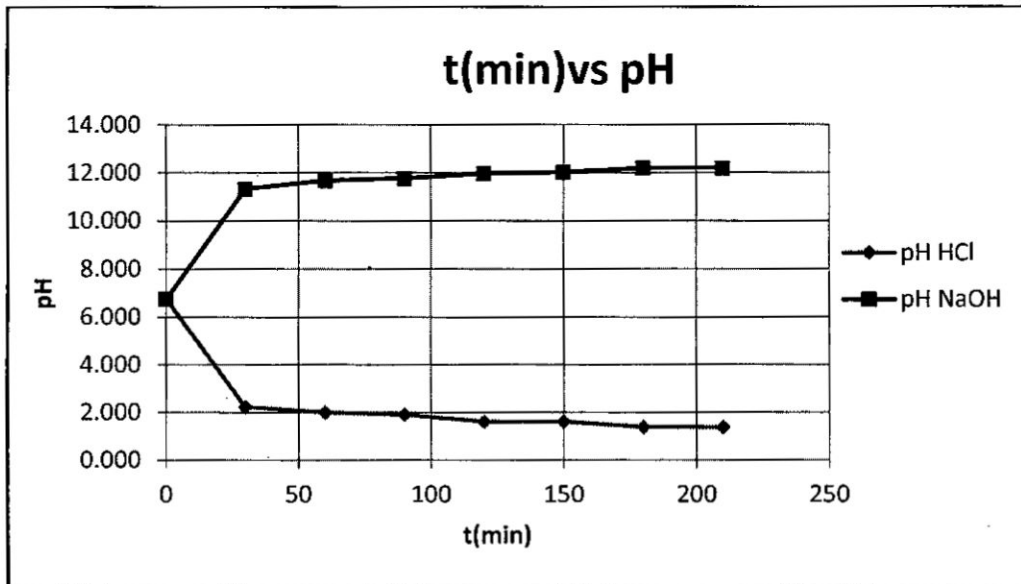
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.4 Tiempo vs Conductividad de HCl e NaOH del experimento N°2



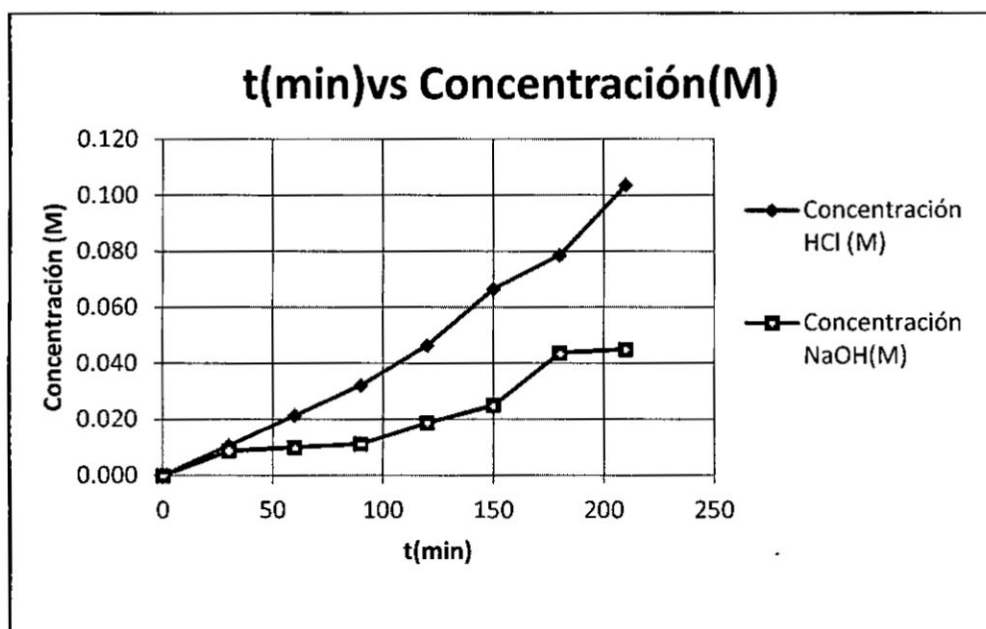
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.5 Tiempo vs pH de HCl e NaOH del experimento N°2



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.6 Tiempo vs Concentración de HCl e NaOH del experimento N°2



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

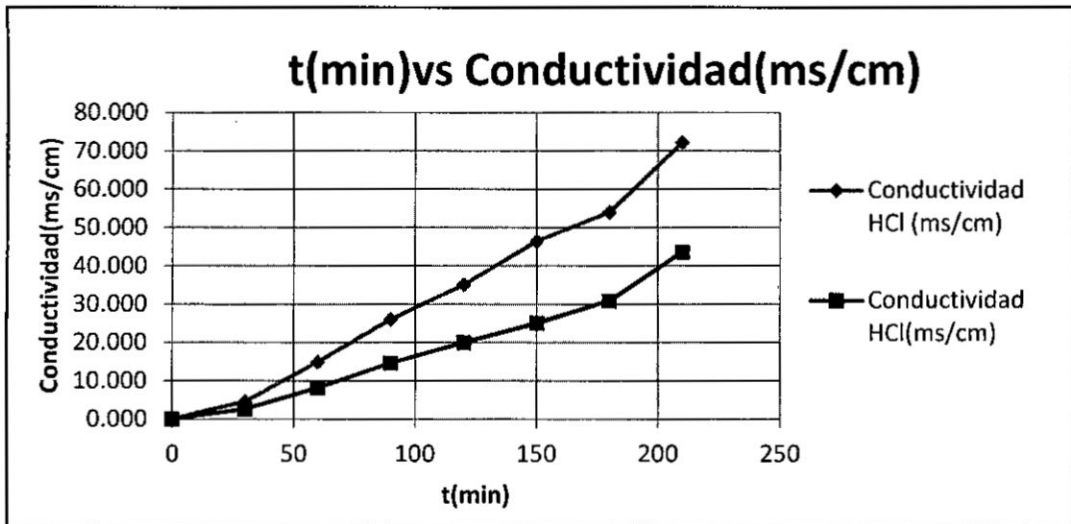
Experimento N°3: Q=800mL/min ,10 V y 38,5 g/l

Tabla N° 5.14 Resultados de concentración, conductividad y pH de HCl, NaOH y NaCl del experimento N°3

	tiempo (min)	0	30	60	90	120	150	180	210
HCl	Conductividad (ms)	0,034	4,610	14,910	26,100	35,100	46,500	54,000	72,300
	PH	6,710	1,770	1,360	1,190	1,100	1,050	1,020	1,010
	Concentración (M)	0,000	0,018	0,061	0,104	0,146	0,189	0,232	0,274
	Conductividad (ms)	0,034	2,630	8,120	14,610	20,000	25,100	30,900	43,700
NaOH	PH	6,710	11,730	11,940	12,110	12,150	12,250	12,330	12,500
	Concentración(M)	0,000	0,009	0,028	0,040	0,063	0,084	0,101	0,121
NaCl	Conductividad (ms)	54,70	41,20	38,30	36,40	34,60	29,90	27,80	24,000
	PH	7,160	7,690	7,520	7,050	6,690	2,850	2,170	1,680
	Concentración(g/L)	38,500	24,070	23,382	22,350	21,663	17,880	16,849	12,035

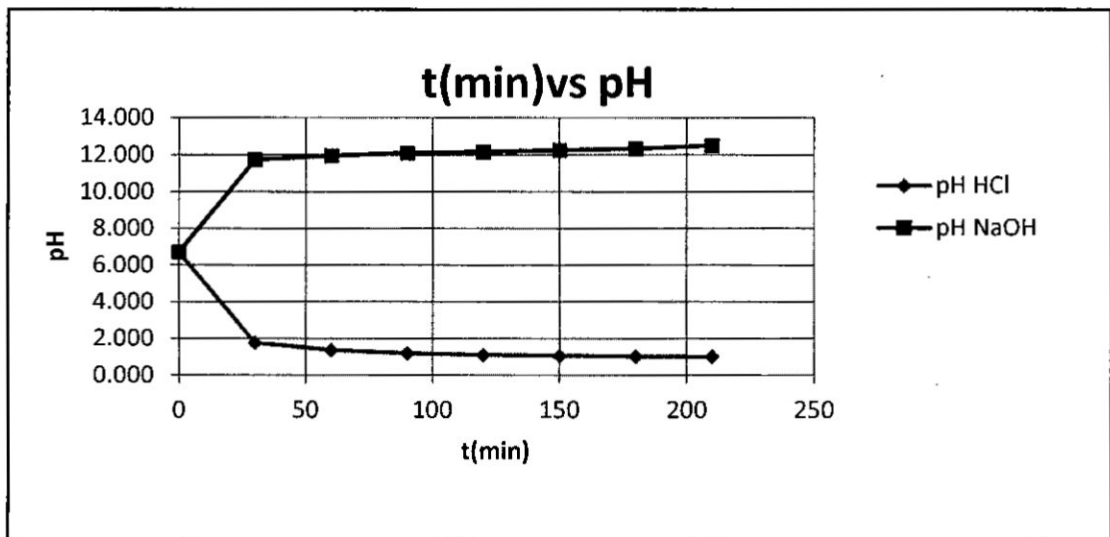
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.7 Tiempo vs Conductividad de HCl e NaOH del experimento N°3



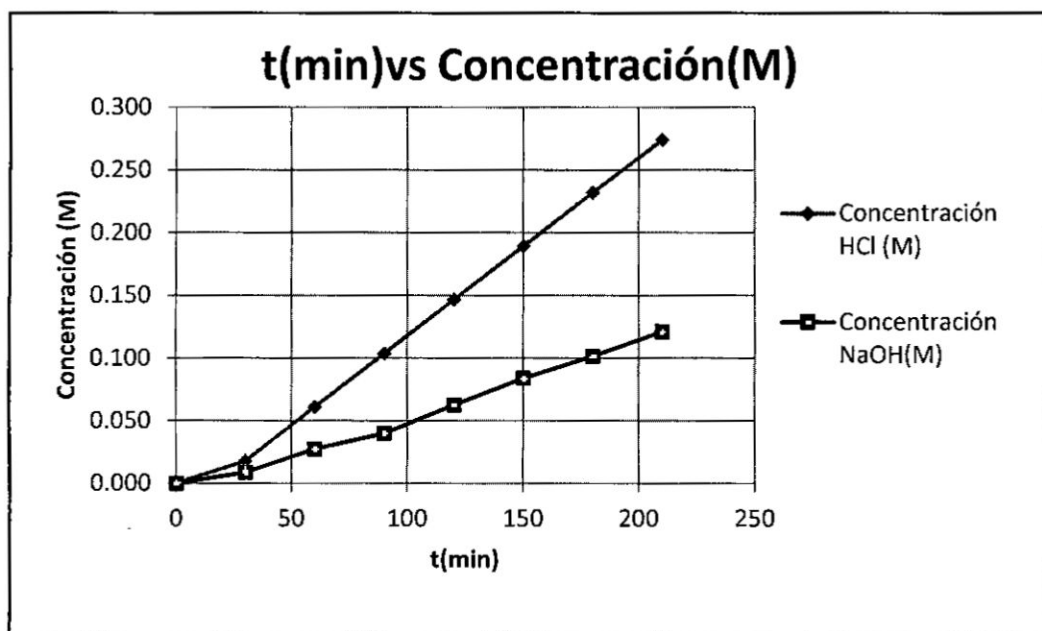
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.8 Tiempo vs pH de HCl e NaOH del experimento N°3



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.9 Tiempo vs Concentración de HCl e NaOH del experimento N°3



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

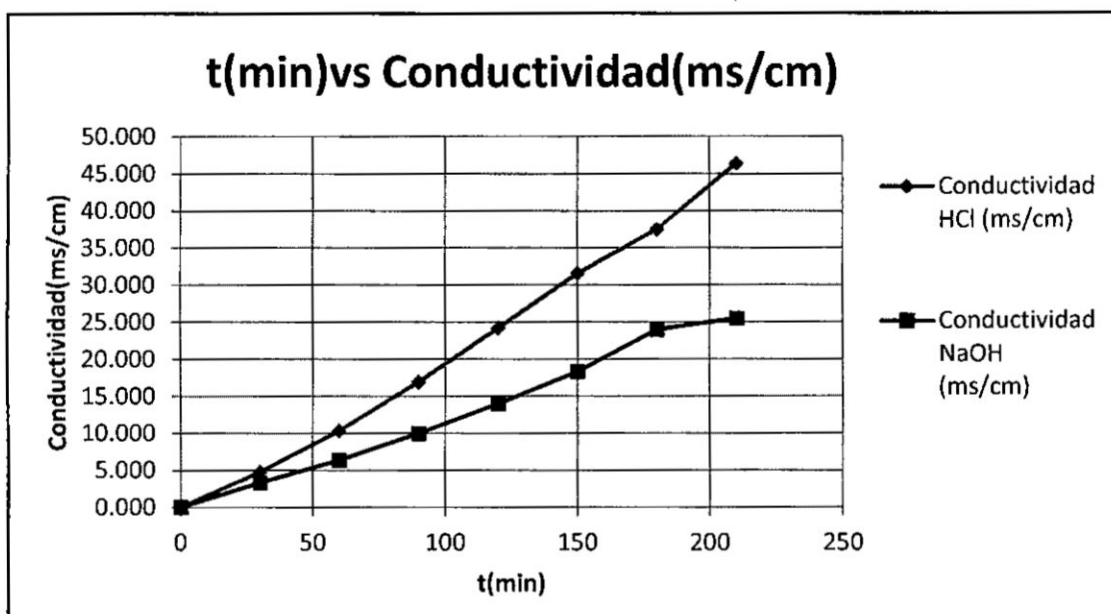
Experimento N°4: Q=800mL/min ,10V y 48,5 g/l

Tabla N° 5.15 Resultados de concentración, conductividad y pH de HCl, NaOH y NaCl del experimento N°4

	tiempo (min)	0	30	60	90	120	150	180	210
HCl	Conductividad (ms)	0,034	4,760	10,330	16,950	24,200	31,600	37,500	46,400
	PH	6,710	1,900	1,640	1,410	1,400	1,220	1,160	1,150
	Concentración (M)	0,000	0,021	0,058	0,0710	0,079	0,126	0,168	0,203
NaOH	Conductividad (ms)	0,034	3,340	6,330	10,010	13,970	18,340	24,000	25,500
	PH	6,710	11,670	11,850	12,130	12,200	12,220	12,250	12,280
	Concentración(M)	0,000	0,010	0,020	0,0310	0,0390	0,054	0,066	0,081
NaCl	Conductividad (ms)	54,700	49,200	49,600	48,200	46,800	44,30	41,800	41,500
	PH	7,160	7,670	7,770	7,680	7,360	7,260	7,010	6,940
	Concentración(g/L)	48,500	30,259	29,915	29,227	28,540	26,133	25,789	25,101

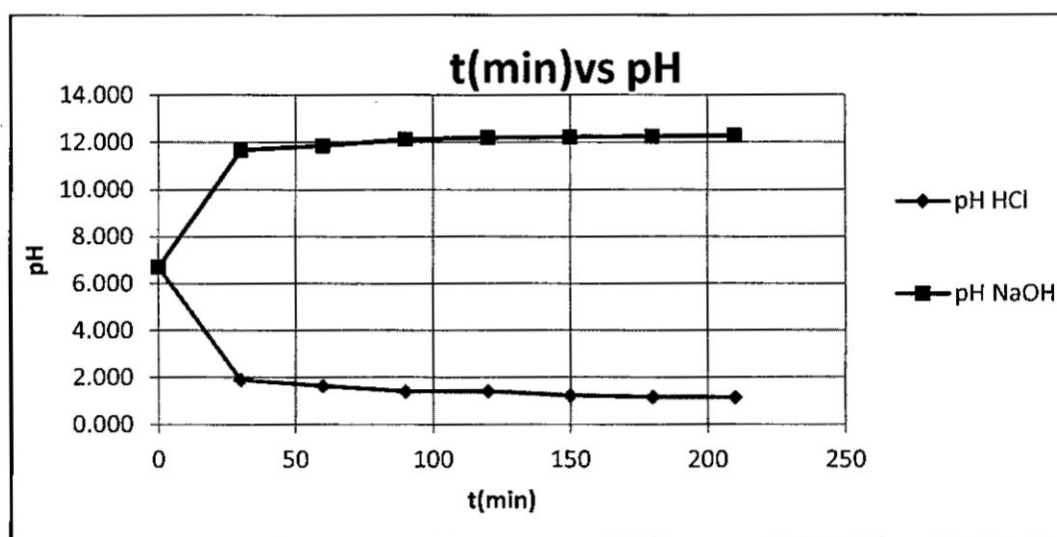
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico 5.10 Tiempo vs Conductividad de HCl e NaOH del experimento N°4



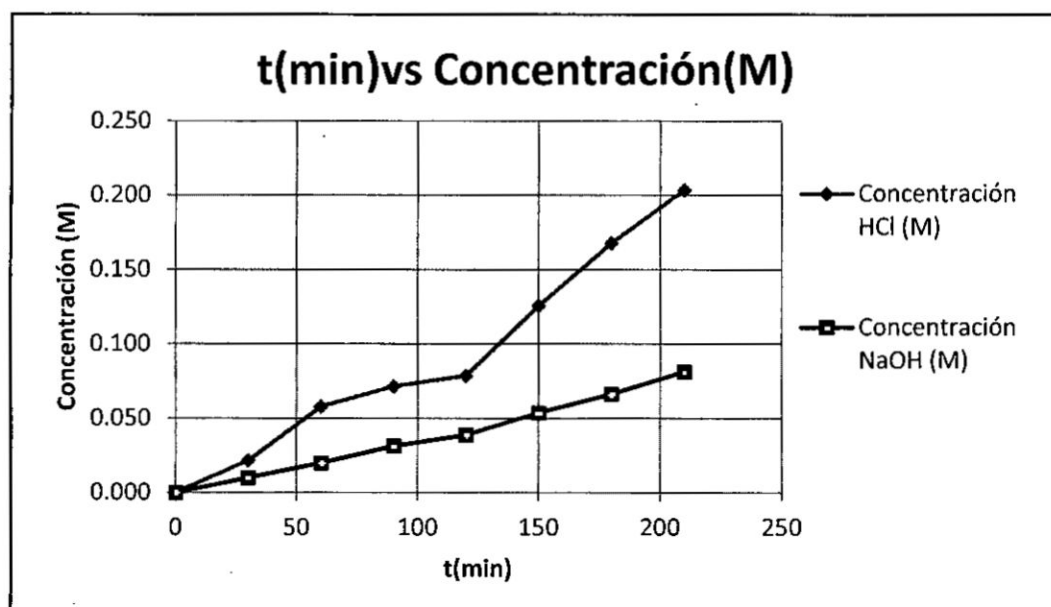
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.11 Tiempo vs pH del experimento N°4



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.12 Tiempo vs Concentración de HCl e NaOH del experimento N°4



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

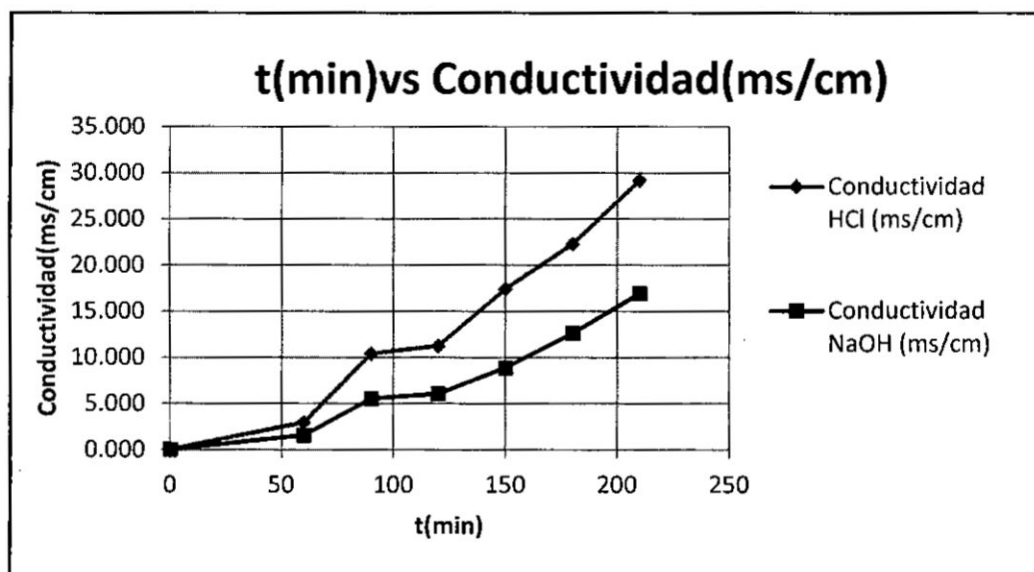
Experimento N°5: Q=1000mL/min ,7V y 38,5 g/l

Tabla N° 5.16 Resultados de concentración, conductividad y pH de HCl, NaOH y NaCl del experimento N°5

tiempo (minutos)		0	60	90	120	150	180	210
HCl	Conductividad (ms)	0,029	2,960	10,420	11,260	17,420	22,300	29,200
	PH	5,730	2,220	1,710	1,780	1,640	1,520	1,410
	Concentración (M)	0,000	0,001	0,028	0,036	0,048	0,068	0,093
NaOH	Conductividad (ms)	0,029	1,587	5,530	6,060	8,890	12,630	16,940
	PH	5,730	11,520	12,030	12,090	12,190	12,310	12,410
	Concentración(M)	0,000	0,015	0,018	0,018	0,027	0,041	0,050
NaCl	Conductividad (ms)	40,700	39,700	39,100	38,800	36,400	36,900	34,700
	PH	6,170	7,160	7,720	8,040	8,050	7,790	7,180
	Concentración(g/L)	38,500	26,764	25,091	29,273	25,509	24,255	22,164

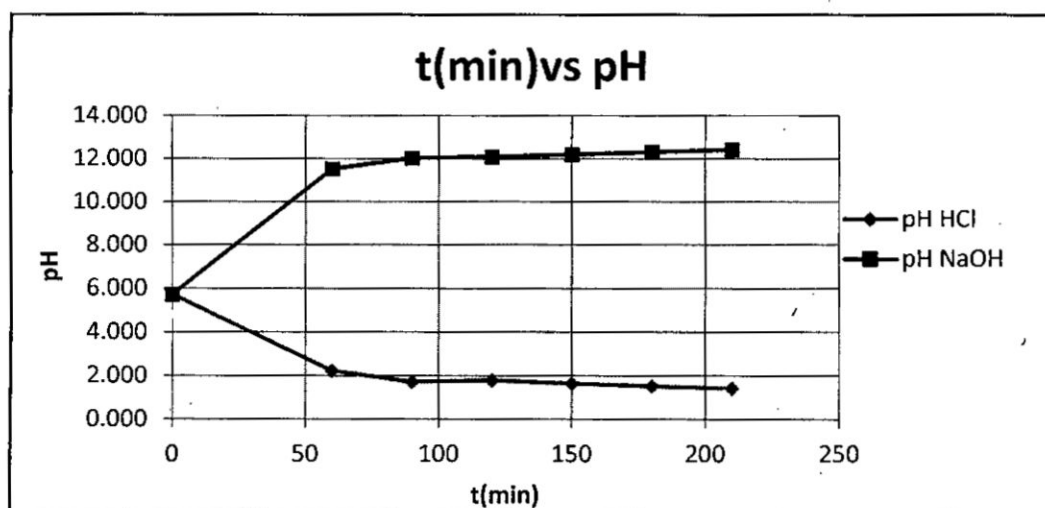
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.13 Tiempo vs Conductividad de HCl e NaOH del experimento N°5



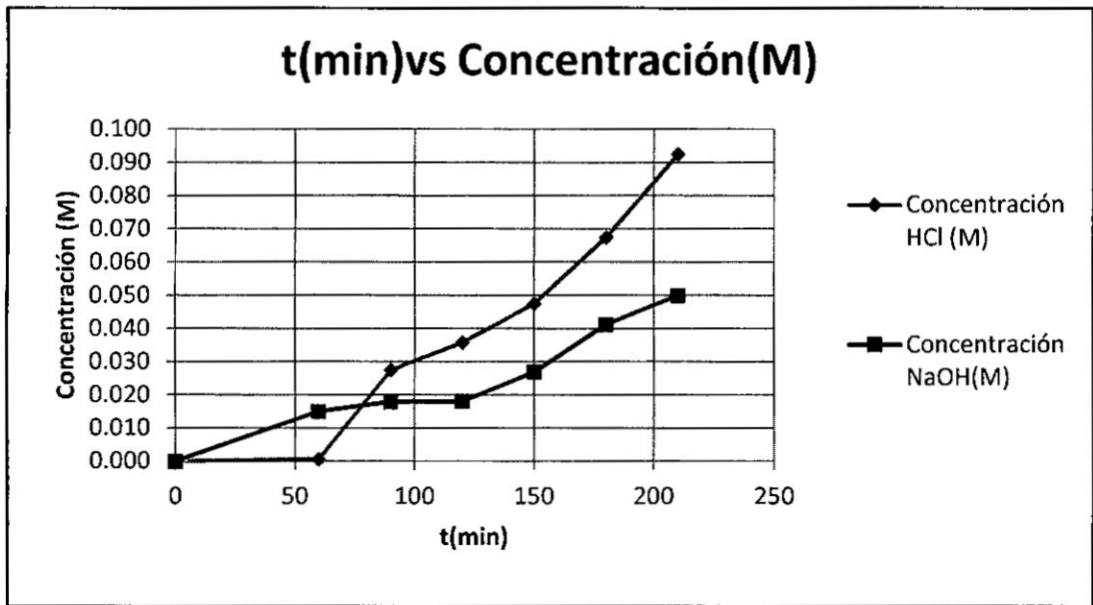
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.14 Tiempo vs pH de HCl e NaOH del experimento N°5



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.15 Tiempo vs Concentración de HCl e NaOH del experimento N°5



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

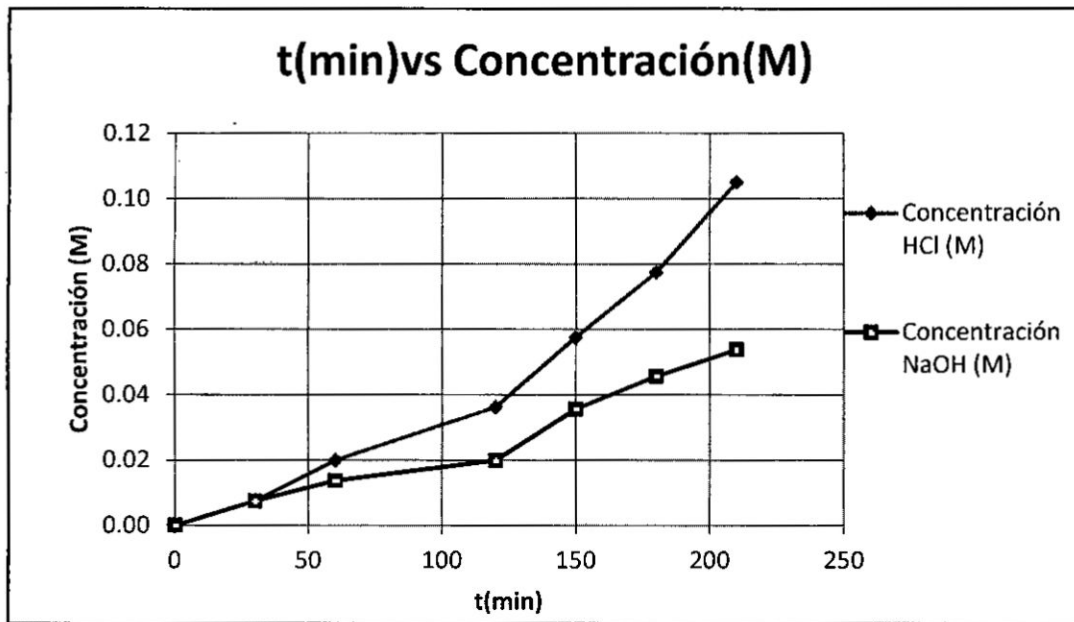
Experimento N°6: Q=1000mL/min ,7V y 48,5 g/l

Tabla N° 5.17 Resultados de concentración, conductividad y pH de HCl, NaOH y NaCl del experimento N°6

tiempo (min)		0	30	60	120	150	180	210
HCl	Conductividad (ms)	0,030	3,200	6,480	12,030	18,100	23,800	30,040
	PH	5,640	2,140	1,860	1,670	1,540	1,400	1,340
	Concentración (M)	0,000	0,010	0,020	0,040	0,060	0,080	0,110
NaOH	Conductividad (ms)	0,030	2,680	4,560	7,420	11,270	14,290	18,010
	PH	5,640	11,650	11,840	12,020	12,200	12,250	12,310
	Concentración(M)	0,000	0,010	0,010	0,020	0,040	0,050	0,050
NaCl	Conductividad (ms)	54,50	50,00	50,300	48,500	470	46,40	45,10
	PH	7,150	7,740	7,890	8,030	8,030	7,980	7,660
	Concentración(g/L)	48,50	38,990	38,990	38,130	37,700	34,280	34,280

Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.18 Tiempo vs Concentración de HCl e NaOH del experimento N°6



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

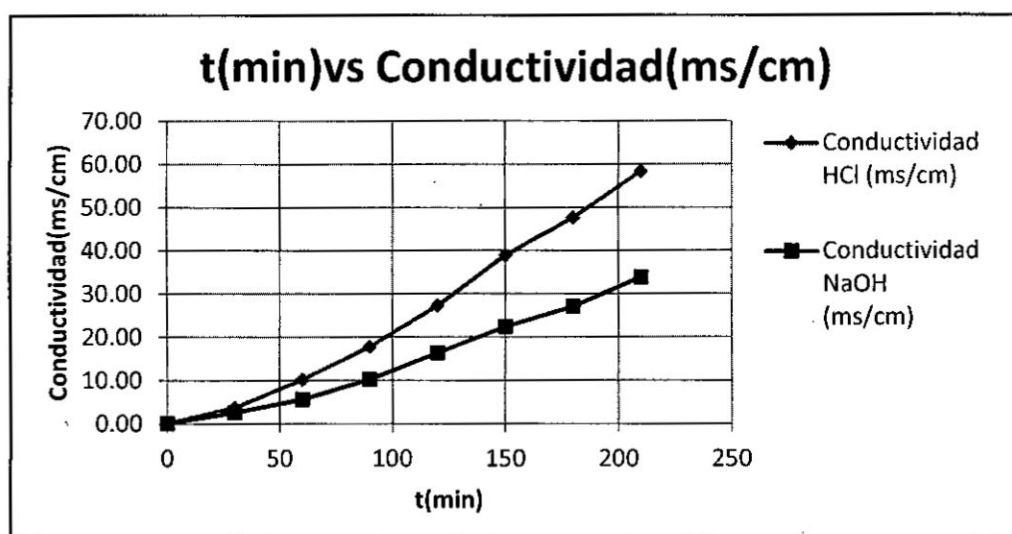
Experimento N°7: Q=1000mL/min ,10 V y 38,5 g/l

Tabla N° 5.18 Resultados de concentración, conductividad y pH de HCl, NaOH y NaCl del experimento N°7

	tiempo (min)	0	30	60	90	120	150	180	210
HCl	Conductividad (ms)	0,040	3,730	10,210	17,870	27,300	39,000	47,600	58,400
	PH	7,570	2,160	1,830	1,580	1,430	1,250	1,240	1,230
	Concentración (M)	0,000	0,020	0,040	0,080	0,130	0,190	0,220	0,260
NaOH	Conductividad (ms)	0,040	2,560	5,690	10,240	16,380	22,400	27,000	33,900
	PH	7,530	11,680	11,930	12,170	12,320	12,450	12,510	12,540
	Concentración(M)	0,000	0,010	0,020	0,030	0,060	0,070	0,090	0,110
NaCl	Conductividad (ms)	46,400	41,500	41,300	39,400	37,300	35,200	32,600	30,100
	PH	6,160	7,440	7,730	7,360	6,940	6,620	5,970	2,360
	Concentración(g/L)	38,500	26,130	25,790	25,100	23,380	21,320	19,940	18,220

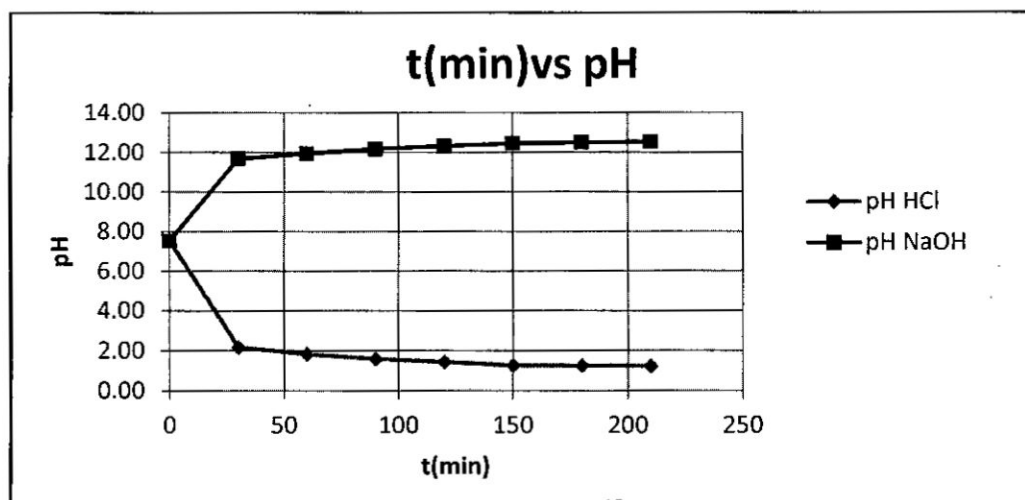
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.19 Tiempo vs Conductividad de HCl e NaOH del experimento N°7



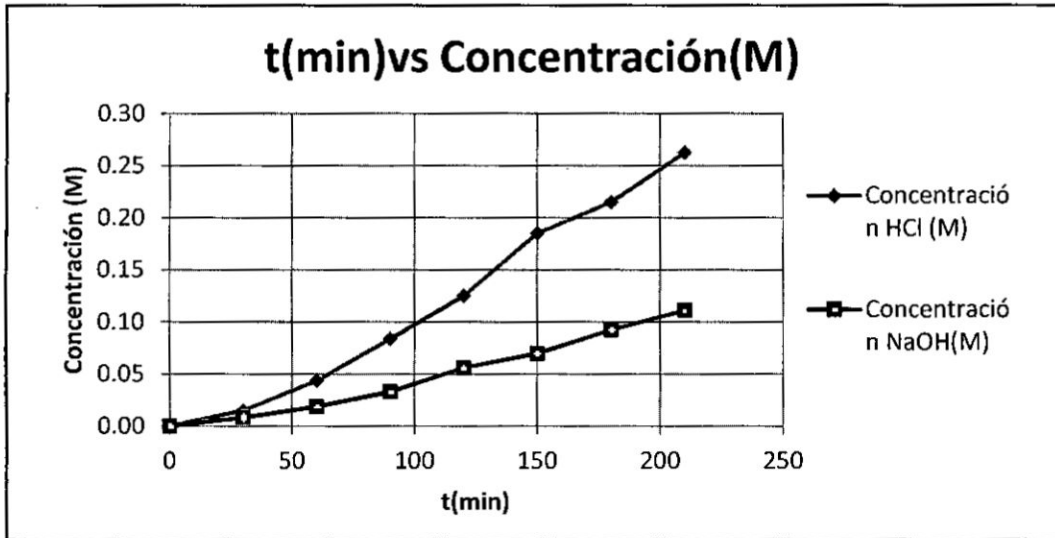
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.20 Tiempo vs del pH de HCl e NaOH del experimento N°7



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.21 Tiempo vs Concentración de HCl e NaOH del experimento N°7



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

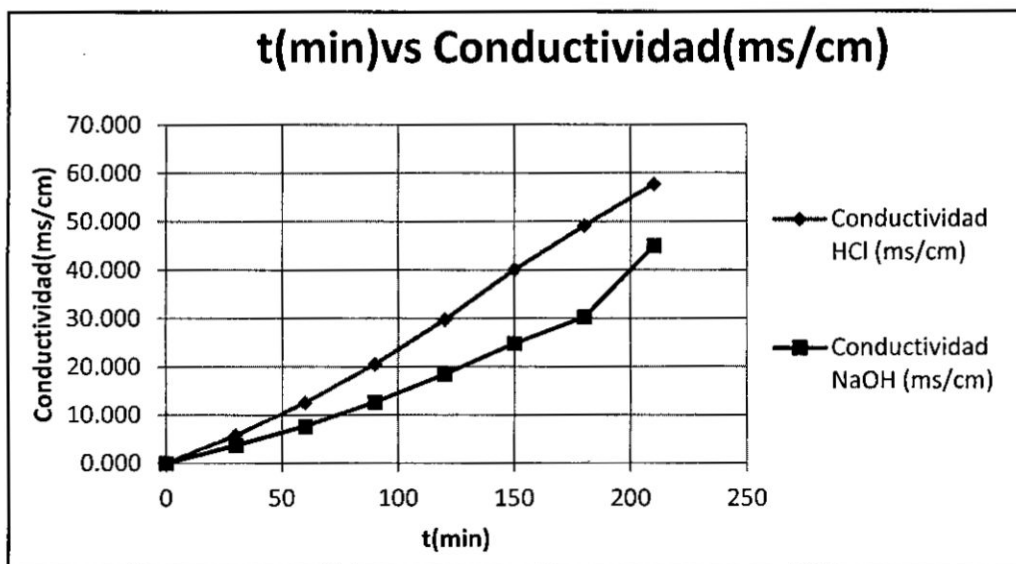
Experimento N°8: Q=1000mL/min ,10V y 48,5 g/l

Tabla N° 5.19 Resultados de concentración, conductividad y pH de HCl, NaOH y NaCl del experimento N°8

	tiempo (min)	0	30	60	90	120	150	180	210
HCl	Conductividad (ms)	0,033	5,860	12,550	20,500	29,700	40,050	49,100	57,700
	PH	5,360	1,890	1,700	1,370	1,360	1,270	1,080	0,940
	Concentración (M)	0,000	0,020	0,053	0,080	0,118	0,173	0,230	0,250
NaOH	Conductividad (ms)	0,033	3,730	7,740	12,690	18,450	24,800	30,300	45,000
	PH	5,360	11,980	12,190	12,340	12,450	12,510	12,480	12,410
	Concentración(M)	0,000	0,013	0,025	0,039	0,059	0,084	0,103	0,126
NaCl	Conductividad (ms)	57,000	49,970	49,400	45,300	44,900	40,900	40,600	36,400
	PH	7,070	7,720	7,850	7,560	7,180	7,090	6,790	6,200
	Concentración(g/L)	48,500	33,750	31,640	30,580	29,530	24,610	24,260	23,550

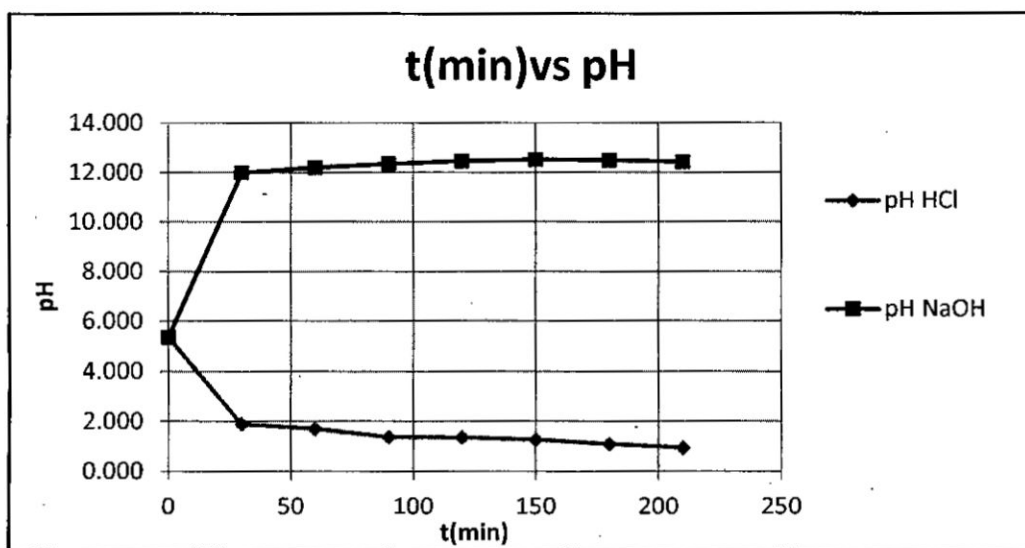
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.22 Tiempo vs Conductividad de HCl e NaOH del experimento N°8



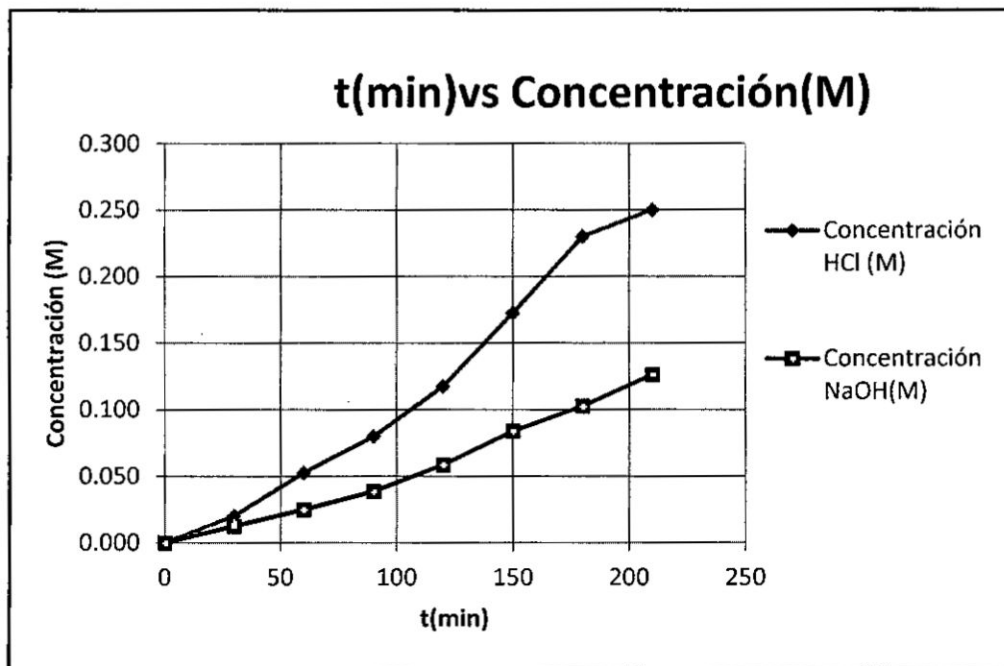
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.23 Tiempo vs pH de HCl e del experimento N°8



Fuente: [Elaboración propia, 2017].

Gráfico N°5.24 Tiempo vs Concentración de HCl e NaOH del experimento N°8



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

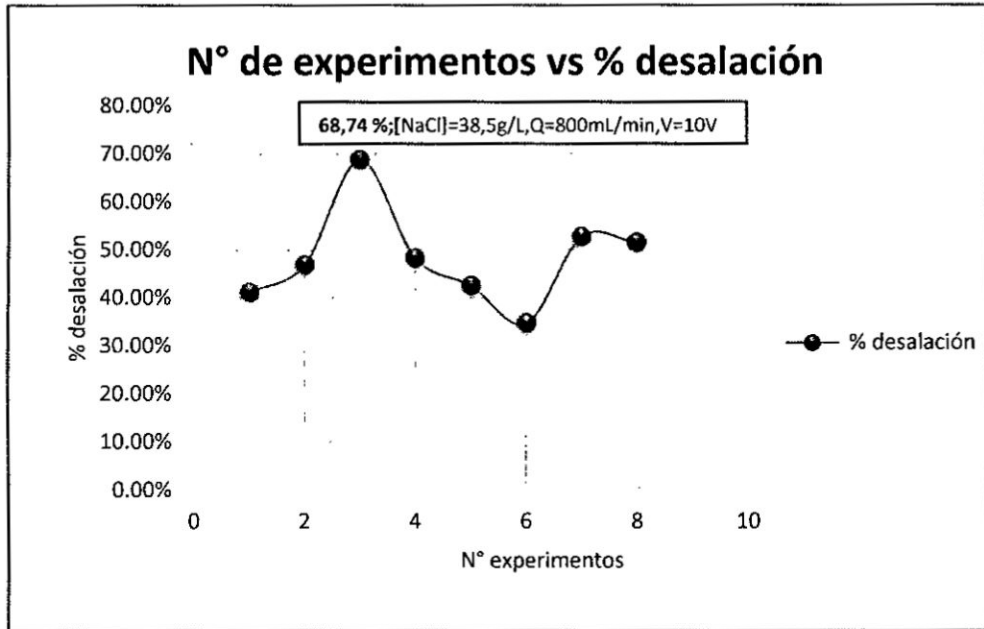
En la siguiente tabla se detallan los resultados de % de desalación, Kwh/Kg NaCl durante los 8 experimentos.

Tabla N °5.20 Resultados de % de desalación, Kwh/Kg NaCl

Volumen TK (L)	Voltaje (V)	[NaCl] inicial (g/L)	Caudal de inicial (mL/min)	[NaCl] final (g/L)	Tiempo (h)	I (A)	% desalación	kWh/KgNaCl	V final NaCl(L)
0,5	7	38,5	800	22,694	3,5	0,52	41,05	0,662	0,490
0,5	7	48,5	800	25,789	3,5	0,57	46,83	0,576	0,460
0,5	10	38,5	800	12,035	3,5	1,05	68,74	1,909	0,460
0,5	10	48,5	800	25,101	3,5	1,05	48,25	1,515	0,470
0,5	7	38,5	1000	22,149	3,5	0,79	42,47	1,005	0,410
0,5	7	48,5	1000	31,710	3,5	0,81	34,62	0,818	0,445
0,5	10	38,5	1000	18,220	3,5	1,2	52,68	2,182	0,445
0,5	10	48,5	1000	23,560	3,5	1,2	51,42	1,732	0,470

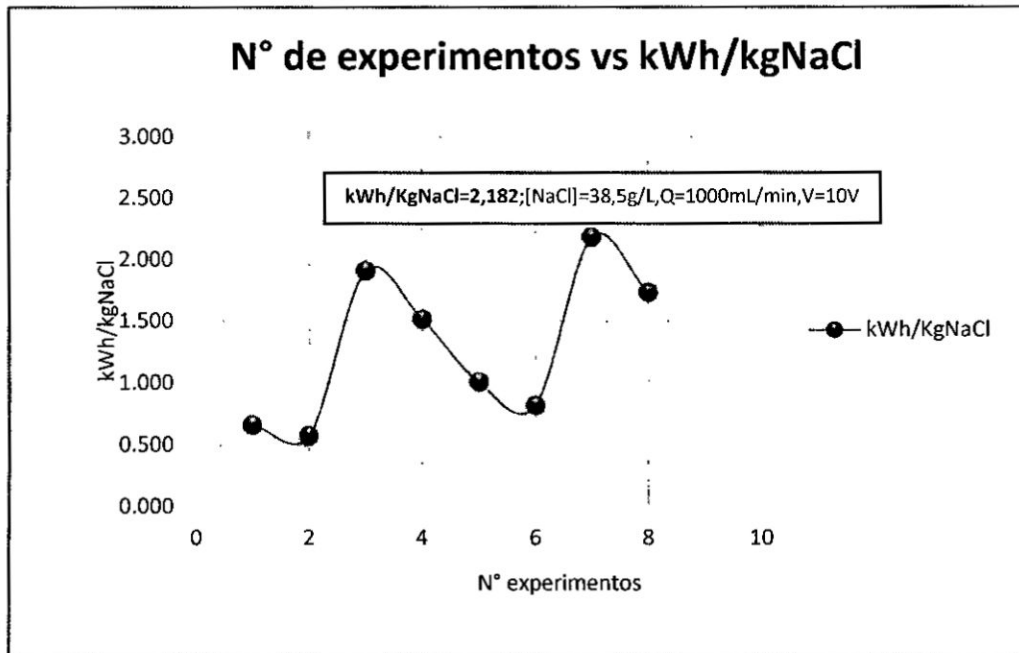
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N° 5.25 N° experimentos vs % desalación



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.26 N° Experimentos vs Kwh/kgNaCl



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Análisis de resultados en Minitab de las concentraciones de HCl con durante los 8 experimentos.

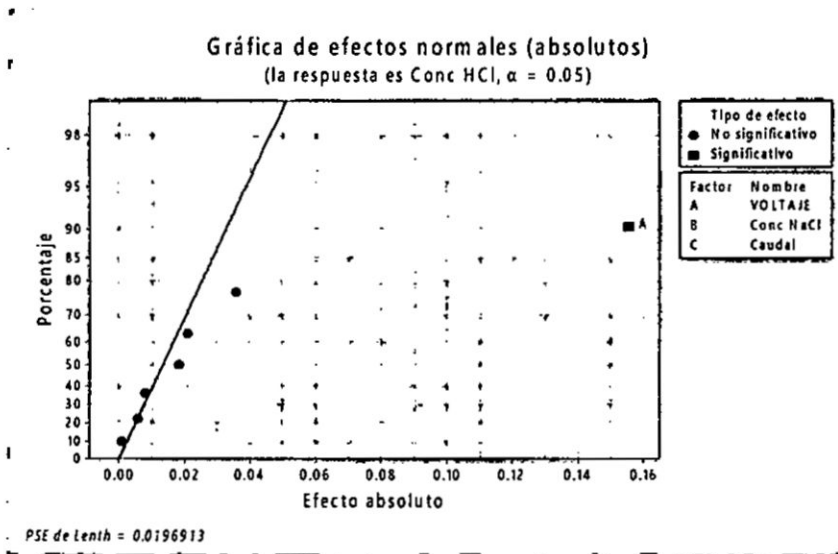
Tabla N° 5.21 Concentraciones obtenidas de HCl

N° Experimentos	Voltaje (V)	[NaCl] inicial (g/L)	Caudal inicial de NaCl	[HCl] (mol/L)
1	7	38,5	800	0,061
2	10	38,5	800	0,274
3	7	48,5	800	0,104
4	10	48,5	800	0,203
5	7	38,5	1000	0,093
6	10	38,5	1000	0,262
7	7	48,5	1000	0,110
8	10	48,5	1000	0,250

Fuente: [Elaboración propia, 2017]

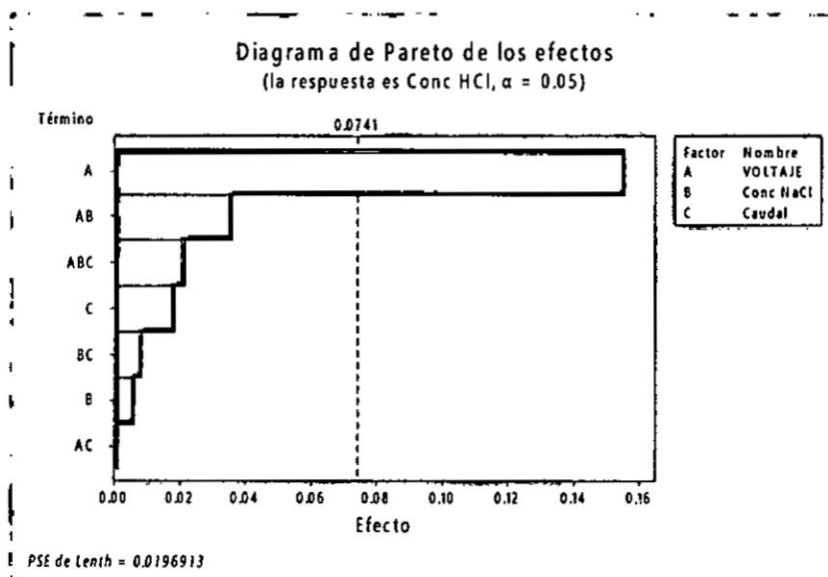
Análisis de resultados en Minitab de las concentraciones de HCl con durante los 8 experimentos.

Gráfico N° 5.27 Gráfica del efecto normal de HCl



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N° 5.28 Gráfica de Pareto de HCl



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

De acuerdo a las variables:

X_1 = Caudal de alimentación

X_2 = Concentración de NaCl

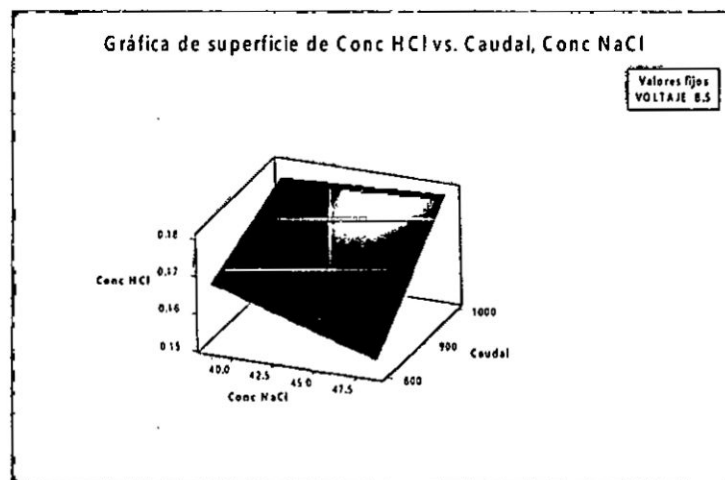
X_3 = Voltaje

Y_1 = Concentración de HCL

Se obtiene la ecuación con el software Minitab:

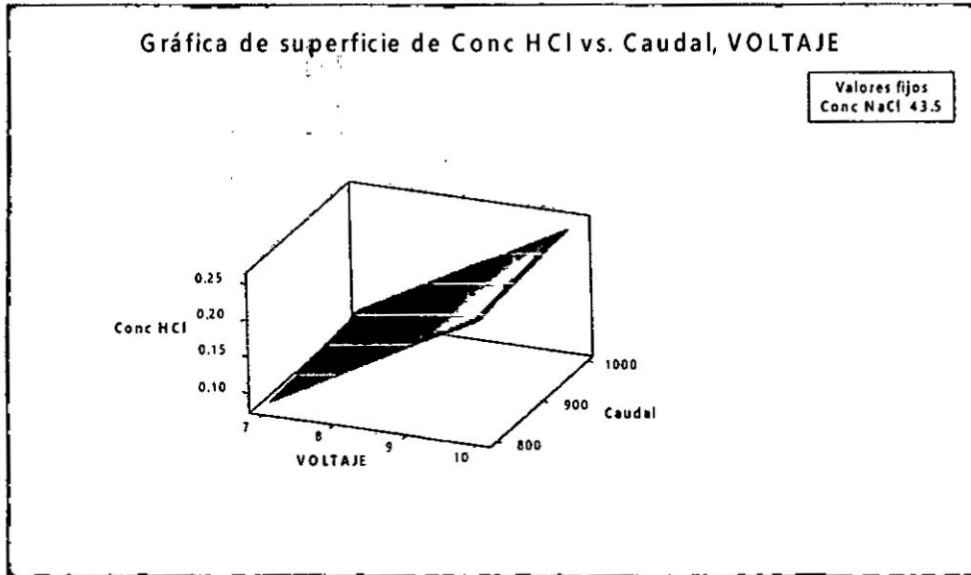
$$Y_1 = -5,574 + 0,7059 X_3 + 0,1196 X_2 + 0,004941 X_1 - 0,01499 X_3 * X_2 - 0,000612 X_3 * X_1 - 0,000111 X_2 * X_1 + 0,000014 X_3 * X_2 * X_1$$

Gráfico N° 5.29 Gráfica de superficie de Concentración de HCl vs Caudal, Concentración de NaCl



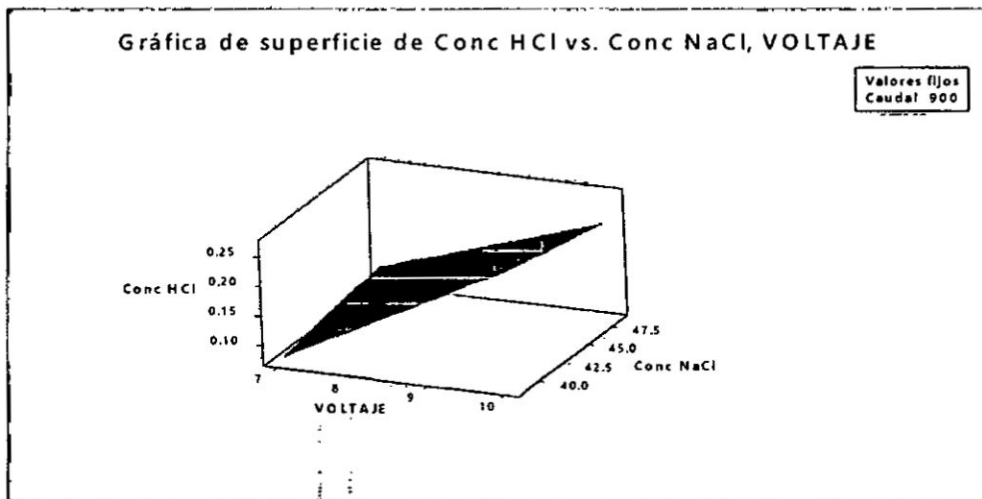
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N° 5.30 Concentración de HCl vs Caudal, Voltaje



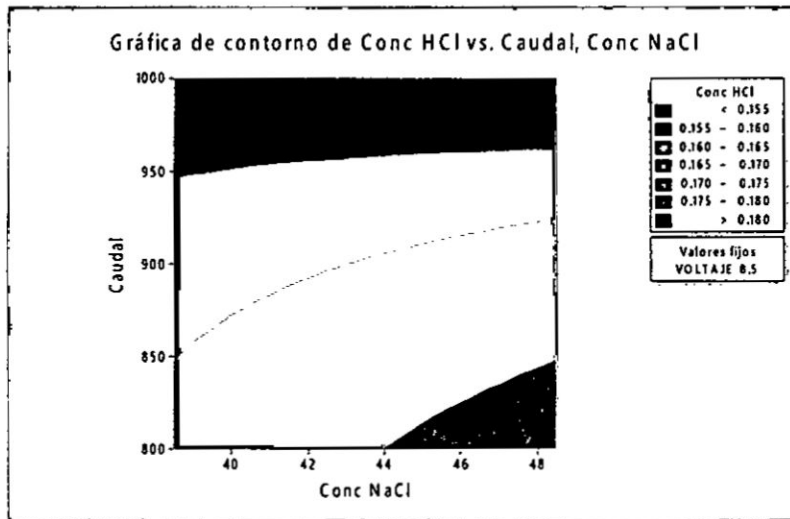
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N° 5.31 Gráfica de superficie de Concentración de HCl vs Concentración de NaCl, Voltaje.



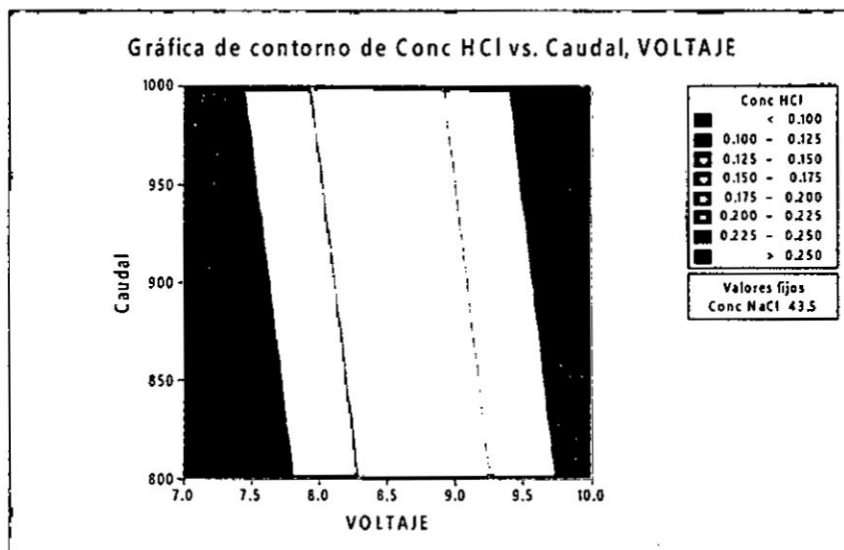
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N° 5.32 Gráfica contorno de Concentración de HCl vs Caudal, Concentración de NaCl.



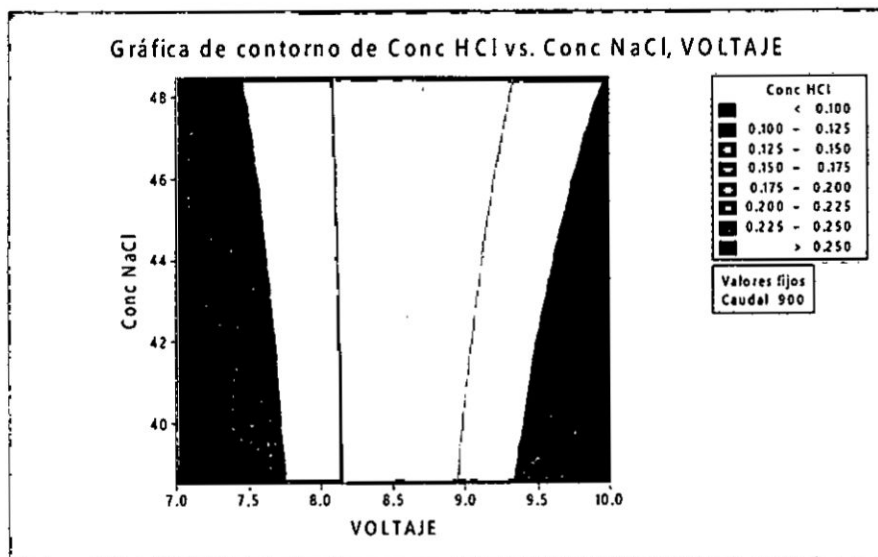
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N° 5.33 Gráfica contorno de Concentración de HCl vs Caudal, Voltaje



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N° 5.34 Gráfica contorno de Concentración de HCl vs Concentración de NaCl, Voltaje



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

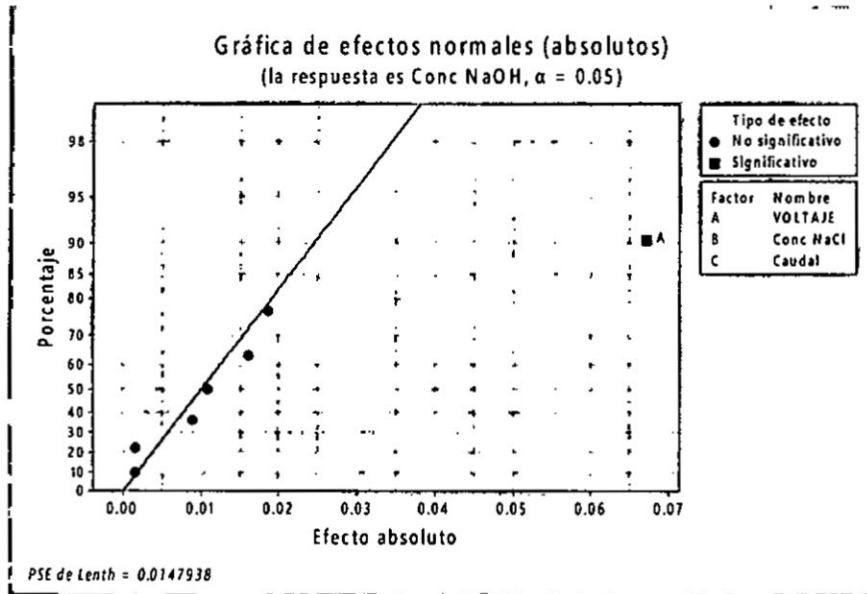
Análisis de resultados en Minitab de las concentraciones de NaOH con durante los 8 experimentos.

Tabla N° 5.22 Concentraciones obtenidas de NaOH

Voltaje (V)	[NaCl] inicial (g/L)	Caudal inicial de NaCl	[NaOH] (mol/L)
7	38,5	800	0,026
10	38,5	800	0,121
7	48,5	800	0,045
10	48,5	800	0,081
7	38,5	1000	0,050
10	38,5	1000	0,111
7	48,5	1000	0,050
10	48,5	1000	0,126

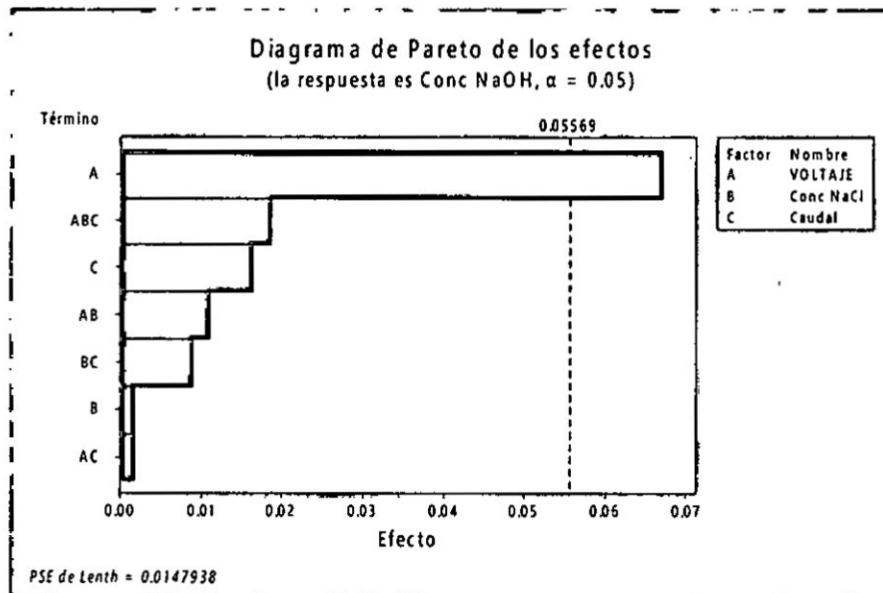
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.35 Gráfica de los efectos normales de NaOH



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.36 Gráfica de Pareto de NaOH



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

De acuerdo a las variables:

X_1 = Caudal de alimentación

X_2 = Concentración de NaCl

X_3 = Voltaje

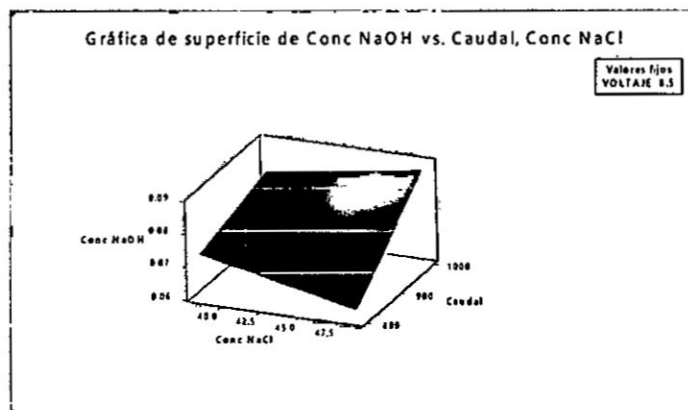
Y_1 = Concentración NaOH

Se obtiene la ecuación con el software Minitab:

$$Y_2 = -4,17 + 0,5326 X_3 + 0,09244 X_2 + 0,004216 X_1$$

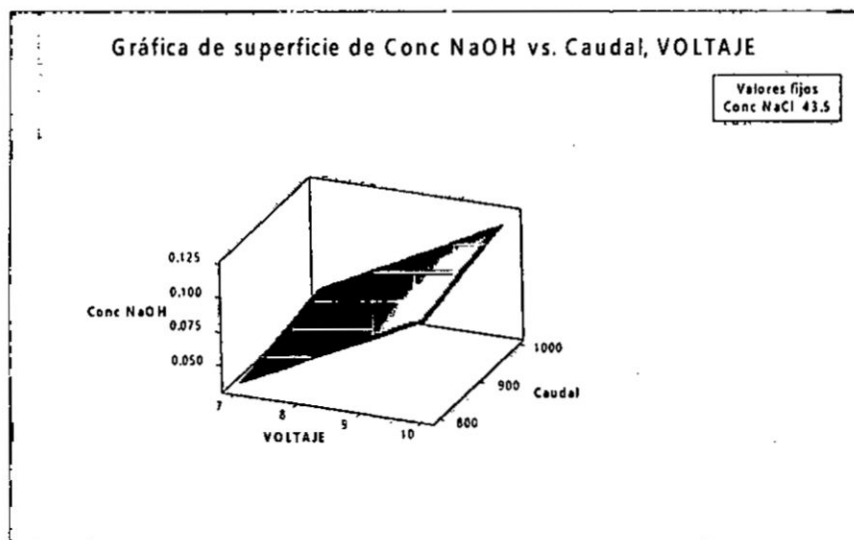
$$- 0,01183 X_3 * X_2 - 0,000532 X_3 * X_1 - 0,000096 X_2 * X_1 + 0,000012 X_3 * X_2 * X_1$$

Gráfico N°5.37 Gráfica de superficie de la concentración de NaOH vs Caudal, Concentración de NaCl



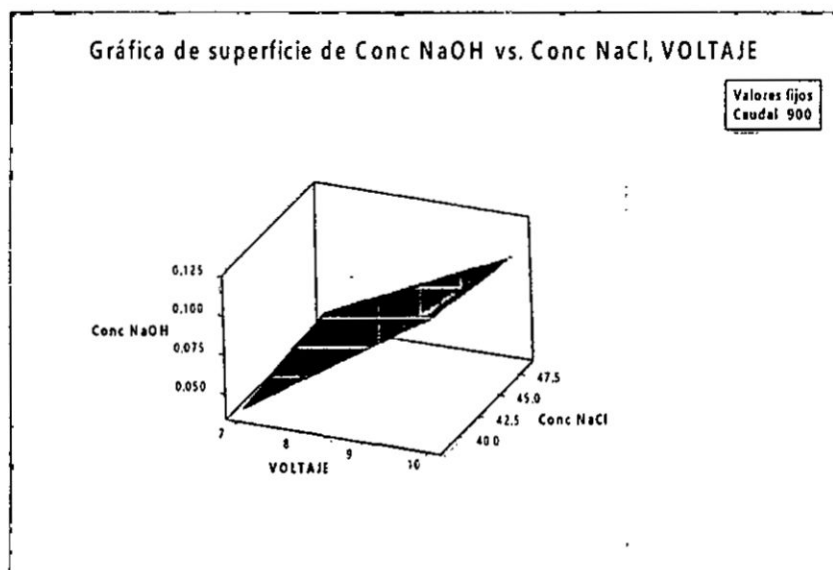
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.38 Gráfica de superficie de la concentración de NaOH vs Caudal, Voltaje



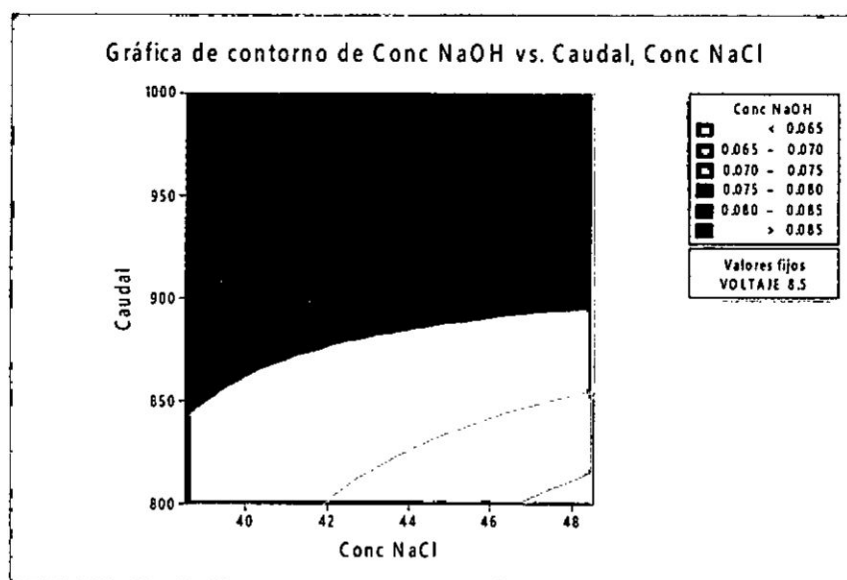
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.39 Gráfica de superficie de la concentración de NaOH vs Concentración de NaCl, Concentración de NaCl



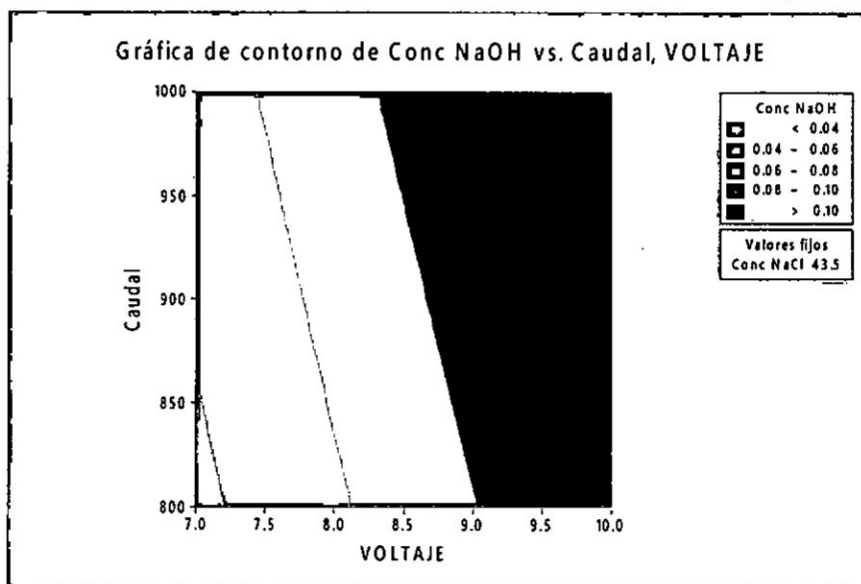
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N°5.40 Grafica de contorno de la concentración de NaOH vs Caudal, Concentración de NaCl



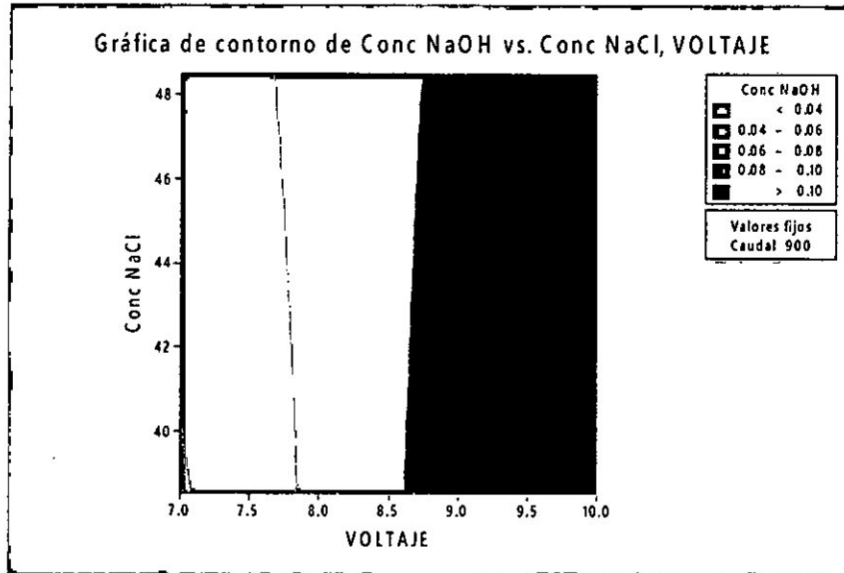
Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N° 5.41 Grafica de superficie de la concentración de NaOH vs Caudal, Voltaje



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

Gráfico N° 5.42 Grafica de superficie de la concentración de NaOH vs Concentración de NaCl, Voltaje



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contratación de Hipótesis con los resultados

Interpretación de los resultados en el paquete estadístico en Minitab

- Prueba de hipótesis para HCl

$$H_0: \mu_0 = 0,2$$

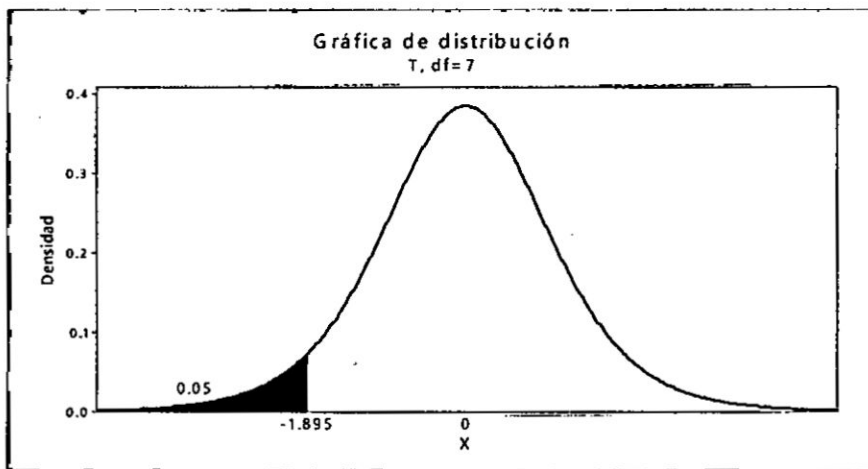
$$H_1: \mu < 0,2$$

$$\alpha = 0,05$$

Encontrado T:

Se realizó la gráfica de distribución para los 8 experimentos.

Gráfico N° 6.1 Gráfica de distribución de la concentración de HCL



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

$$T = -1,895$$

Como $n < 30$

Se utiliza t_c :

$$t_c = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

$$\bar{X} = 0,1697$$

$$\mu = 0,2$$

$$s = 0,0867$$

$$n = 8$$

$$t_c = -0,99$$

$$p = 0,178$$

Como $p > \alpha$

Decisión: se acepta H_0

Conclusión: a un nivel de significancia del 95% existe la suficiente evidencia para concluir que la concentración del ácido clorhídrico es mayor igual a 0,2.

Estándar	Límite de la superior						
	Variable	N	Media	Desv.Est.	Media	de 95%	T
Conc HCl	8	0,1697	0,0867	0,0307	0,2278	-0,99	0,178

- **Prueba de hipótesis para NaOH**

$$H_0: \mu_0 = 0,2$$

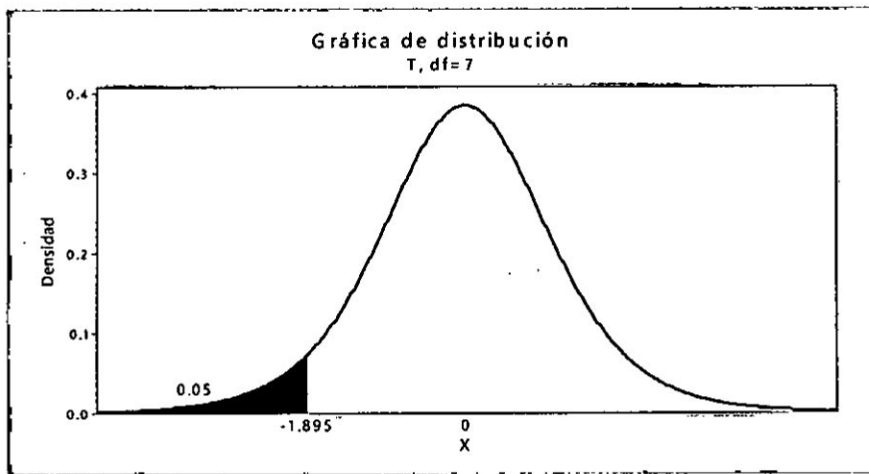
$$H_1: \mu < 0,2$$

$$\alpha = 0,05$$

Encontrado T:

Se realizó la gráfica de distribución para los 8 experimentos.

Gráfico N° 6.2 Gráfica de distribución de la concentración de NaOH



Fuente: [Elaboración propia, 2017]

$$\bar{X} = 0,0764$$

$$\mu = 0,2$$

$$s = 0,0389$$

$$n = 8$$

$$t_c = -8,98$$

$$p = 0,00$$

Como $p < \alpha$

Decisión: se rechaza H_0

Conclusión: a un nivel de significancia del 95% se puede afirmar que la concentración promedio es menor que 0,2.

Estándar	Límite de la superior						
	Variable	N	Media	Desv.Est.	Media de 95%	T	P
Conc NaOH	8	0,0764	0,0389	0,0138	0,1025	-8,98	0,000

6.1. Contrastación de resultados con otros estudios anteriores

Según el artículo:

Integración de electrodiálisis monopolar y bipolar para la valorización de Salmueras de desalinización de ósmosis inversa de agua salada: Producción de ácido fuerte y base

Tabla N° 6.1 Resultados obtenidos según artículo: Producción de ácido fuerte y base

Voltaje(V)	[NaCl] inicial (g/L)	Tiempo (horas)	[HCl] inicial (mol/L)	[NaOH] inicial (mol/L)	[HCl] final (mol/L)	[NaOH] final (mol/L)
9	52,98	2,54	0,12	0,10	0,88	0,71
9	53,60	2,44	0,06	0,05	0,90	0,66

Fuente: [M.Reig .S. Casas, Valderrama, O. Gibert. J .L .Cortina, 2016]

Según nuestro estudio se obtuvo lo siguiente:

Tabla N° 6.2 Resultados obtenidos durante la investigación

Voltaje(V)	[NaCl] inicial (g/L)	Tiempo (horas)	[HCl] inicial (mol/L)	[NaOH] inicial (mol/L)	[HCl] final (mol/L)	[NaOH] final (mol/L)
10	48,500	3,5	0	0	0,203	0,081
10	48,500	3,5	0	0	0,250	0,126

Fuente: [Elaboración propia, 2017]

VII. CONCLUSIONES

De la investigación se puede concluir:

- a) El análisis estadístico aplicado al diseño de experimentos a un nivel de significancia del 95% ($\alpha=0,05$):
 - Tiene un efecto sobre la concentración de ácido clorhídrico HCl, ($p=0,178 > \alpha$); por lo tanto, se acepta la hipótesis nula H_0 .
 - Tiene un efecto sobre la concentración de NaOH ;por lo tanto, se puede decir que al menos una variable es significativas en el experimento en este caso el voltaje(V), pero no es determinante para aceptar la hipótesis debido a que ($p=0 < \alpha$); por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula H_0 , se acepta la hipótesis alternativa H_1 .
- b) Se determinó que mayor caudal de entrada de NaCl influye en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico aumentando la concentración de ácido y base obtenida.
- c) Se determinó que mayor concentración de NaCl influye en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico aumentando la concentración de ácido y base obtenida.
- d) El análisis estadístico demostró que el voltaje es la variable significativa que influye en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico para aumentar la concentración de ácido y base.

IX. RECOMENDACIONES

- a) Se recomienda trabajar con concentraciones altas de cloruro de sodio para obtener altas concentraciones de ácido y base para reducir el consumo de energía.
- b) Se recomienda iniciar la experimentación con concentraciones de ácido y base diferentes de cero para obtener concentraciones altas de ácido y base.
- c) Se recomienda hacer la experimentación con voltajes altos para obtener concentraciones altas de ácido y base.
- d) Se recomienda incrementar el tiempo de trabajo para obtener mayor concentración de ácido y base y en posteriores investigaciones utilizar el tiempo como variable independiente.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ALISSON, Susan. **Intercambiadores Iónicos**. Disponible en :
<https://es.scribd.com/document/226713729/INTERCAMBIADORES-IONICOS>. Artículo web. Consultado el 25 de noviembre del 2016.
2. ALEJANDRO, Andrea. **Tratamiento de agua por intercambio iónico**. Disponible en :
<https://www.scribd.com/document/326092422/Intercambio-Ionico>. Artículo web. Consultada el 02 de julio del 2016.
3. ANH T.K. TRAN. PRIYANKA MONDAL. JIUYANG LIN. BOUDEWIJN MEESSCHAERT. LUC PINOY. BART VAN DER BRUGGEN. **Simultaneous regeneration of inorganic acid and base from a metal washing step wastewater by bipolar membrane electrodialysis after pretreatment by crystallization in a fluidized pellet reactor**. 1 to 10. September 2014.
4. APHA. **Standard Methods for the Examinations of Water and Wastewater**. Method 4500 – CL.1995.
5. A.RODRIGUEZ, Sergio. **La dureza de agua**. Disponible en:
http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/dureza_agua.pdf. Artículo web. Consultado el 2 de Agosto del 2017.
6. ARRIAGADA HERNÁNDEZ, Pablo Andrés. **Diseño, construcción y optimización de una celda de electro obtención de cobre con cátodo particulado móvil basada en electro diálisis reactiva**. Tesis para optar al grado de magíster. Chile. Universidad de Chile.2006.
7. BABU R, Nott. **Recovering Acid and Caustic from Ion-Exchange Regeneration Wastes**. *Chemical Research Depam. Research Division Ontario Hydro. Toronto. Canada MBZ 5S4*.
8. BERROCAL, Patricio. **Diseño Experimental**. Disponible en:
<https://www.scribd.com/document/98904413/Apuntes-de-Diseno-Experimental>. Artículo web. Consultado el 24 de setiembre del 2016.

9. *D MANUEL RICO. D MARIANO SANTISTEBAN. "Manual de Física y Elementos de Química" .Madrid.1856.*
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27060657>.Artículo.web.Consultado el 12 junio del 2016.
10. HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto. FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos. PILAR BAPTISTA, Lucio. **"Metodología de la investigación"** México. Editorial MC Graw Hill. 3ª Edición. 2002.
11. HIDALGO DOMINGUEZ, Fanny Esther. GUAMAN PEREZ Marco Vinicio. **Diseño y construcción de un desmineralizador de lecho múltiple. Tesis** para optar por el título profesional de Ingeniero Químico. Guayaquil. Universidad de Guayaquil.2006.
12. M, Colortest .**Test dureza total.** Disponible en :
<https://www.scribd.com/document/283872126/Dureza-total>
 Artículo web. Consultada el 21 de agosto del 2016.
13. MEDINA COLLANA, Juan Taumaturgo. **Desarrollo de módulos de electrodiálisis para la desalinización de aguas salobres: Determinación de parámetros físicos y evaluación experimental de modelo difusional.** Tesis para optar el Grado Académico de Maestro en Ingeniería de Procesos. Perú. Universidad Nacional de Ingeniería.2009.
14. MEDINA ROA, Israel Fernando. **Tratamiento de aguas de producción con electrodiálisis .**Tesis para optar por el título profesional de Ingeniero Químico. Mérida. Universidad de los Andes. 2007.
15. MERCK KGAA. **Hoja De Seguridad de NaOH.** FrankfurterStrabe 250 64293 Darmstadt Germany. 2015.
16. M.GÓMEZ, Marcelo. **"Introducción a la metodología de la investigación científica"**. Córdoba. Editorial Brujas. 2006.
17. M. REIG,S. CASAS, C. VALDERRAMA, O. GIBERT ,J.L. CORTINA, **"Integration of monopolar and bipolar electrodyalisis for valorization of seawater reverse osmosis desalination brines:Production of strong acid and base.** Science Direct. 1 to 11. July 2016.

18. NATHAN PEMBER, B . **“Modelo BDST del comportamiento de la columna de intercambio de iones de sodio con resina catiónica ácida fuerte en relación con el tratamiento del agua de veta de carbón”**. Journal of Environmental Chemical Engineering. VOL .4:2216-2224. Junio de 2016.
19. N. P. G. Chandrasekhar Pashey. **Disalination** .Science direct .VOL.357: 1-286. Febrero 2015.
20. OCHOA. J. **Electrosíntesis y electrodiálisis (fundamentos, aplicaciones tecnológicas y tendencias)**. McGraw-Hill. Madrid.1996. pág. 6-9.
21. PABLO MARTIN, Tanco Rainusso **Metodología para la aplicación de diseño de experimentos (DOE) en la industria**. San Sebastián. Mayo 2008.
22. POPOVSKY, Matías J. **El diseño experimental y los métodos de taguchi: conceptos y aplicaciones en la industria farmacéutica** Disponible en : <http://www.ucema.edu.ar/publicaciones/download/documentos/258.pdf> Artículo web. Consultada el 19 de octubre del 2016.
23. RAVEN PH. JOHNSON GB. LOSOS JB. MASON KA & SINGER SR. **Biology**. Hong Kong .Editorial. McGraw -Hill Companies. Inc. 10th edition. 2014.
24. REVILLARD ULLOA. JOHN ARIEL. **Proyecto de un sistema de distribución de cal para planta de tratamiento de aguas en oxy-chile**. Tesis para optar por el título profesional de Ingeniero Mecánico. Chile. Universidad Austral de Chile.2005.
25. SAMA, Jefferson. **Obtención Del Cloruro de Calcio**. Disponible en: www.scribd.com/document/231660702/Obtencion-Del-Cloruro-de-Calcio Artículo web. Consultada el 17 de octubre del 2016.
26. SANJANA HARESH, Sadhwani. **Tecnología de Membranas**. Disponible en: http://sanjanasadhvani.weebly.com/uploads/1/0/6/4/10643581/trabajo_electrodialisis.pdf. Artículo web. consultado el 6 mayo del 2015.

27. SARAH J. Bogart. **Rapid changes in water hardness and alkalinity.**
Disponible en:
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27060657>. Artículo.web.
Consultado el 12 junio del 2016
28. SEUNG-HYEON MOON AND SUNG-HYUN YUN. **Process integration of electro dialysis for a cleaner environment.** Science Direct.
1 to 4. February 2014.
29. SHIGEKI MATSUNAGA. **Effect of sulfate anion on the structure and transport properties of seawater: a molecular simulation study.**
Science direct. Vol.226: 90 a 95. January 2017.
30. SUSIAL. P; GONZALES. J; CABRERA. I; FERNANDEZ. F.
Dimensionamiento y diseño de la electrodiálisis (I) membranas y módulos. Ingeniería Química. N° 375. Pág 291-298. 2001.
31. TANCO.R, Martín. **Aplicación del Diseño de Experimentos (DoE) para la mejora de procesos.** Tesis para optar para obtener el grado de doctor. España. Universidad de Navarra, San Sebastián, España.2005.
32. THERMO FISHER SCIENTIFIC. **Electrochemistry training.** Disponible en :
<http://slideplayer.es/slide/1731828/>. Artículo web. Consultado el 7 julio del 2017.
33. TREJO, Aarón. **Hoja de seguridad hidróxido de sodio.**
Disponible en:
<https://www.clubensayos.com/Ciencia/HOJA-DE-SEGURIDAD-HIDROXIDO-DE-SODIO/2525512.html>. Artículo web. Consultado el 3 de mayo del 2015.
34. UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL. **Disociación del agua.**
Disponible en:
<https://es.scribd.com/document/284365619/Desionizacion-Del-Agua-1>.
Consultado el 5 de junio del 2017.
35. UNIVERSIDAD SAN LUIS GONZAGA DE ICA. **Elastómero.**
Disponible en:

<https://es.scribd.com/document/267703404/Elastomero-Version-2>.

Artículo web. Consultado el 2 de junio del 2017.

36. VALVERDE ESTRELLA, Edgar, **Proyecto Final de Carrera Barcelona**.

España. Universidad Politécnica de Catalunya.2014.

37. VELASQUEZ, Miriam. **Determinación de la acidez, la alcalinidad y la dureza total en agua**. Disponible en:

<https://es.scribd.com/document/248572563/Acidezalcalinidad-y-Dureza>.

Artículo web. Consultada el 12 de agosto del 2016.

ANEXOS

Tabla A1: Matriz de consistencia de la Obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de agua de regeneración de resinas de intercambio iónico

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Es posible obtener HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de agua de regeneración de resinas de intercambio iónico?	Obtener HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico.	Se obtendrá de HCl e NaOH con una concentración de 0.2 M de HCl y 0.2 M de NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico.	Y ₁ = Concentración HCl obtenida mediante electrodiálisis a partir de agua de regeneración de resinas de intercambio iónico. Y ₂ = Concentración NaOH obtenida mediante electrodiálisis a partir de agua de regeneración de resinas de intercambio iónico.	-Concentración de HCl e NaOH -pH de HCl e NaOH -Conductividad de HCl e NaOH.	-mol/L -Adimensional -ms/cm	- Procedimiento experimental: -Análisis titulométrico Acido-Base -Medición de conductividad y pH
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿El caudal de alimentación de NaCl influye en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico?	-Determinar la influencia del caudal de alimentación en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico.	-Influirá positivamente el caudal de alimentación de cloruro de sodio en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico.	-Caudal de alimentación de NaCl en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico	-Caudal de alimentación de NaCl	-mL/min	- Procedimiento experimental -Medición de caudal de alimentación.

<p>- ¿La concentración de alimentación de NaCl influye en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico?</p>	<p>-Determinar la influencia de la concentración de alimentación de NaCl en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico.</p>	<p>-Influirá positivamente la concentración de alimentación de NaCl en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico.</p>	<p>- Concentración de alimentación de NaCl en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico.</p>	<p>-Concentración de Alimentación de NaCl</p>	<p>-g/L</p>	<p>- Procedimiento experimental: -Análisis titulométrico: Cloruros.</p>
<p>-¿El voltaje influye en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico?</p>	<p>-Determinar la influencia del voltaje en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico.</p>	<p>-Influirá positivamente el voltaje en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico.</p>	<p>- Voltaje en el proceso de obtención de HCl e NaOH mediante electrodiálisis a partir de las aguas de regeneración de resinas de intercambio iónico.</p>	<p>-Voltaje</p>	<p>-V</p>	<p>- Procedimiento experimental. -Medición de voltaje.</p>

Fuente: [Elaboración propia , 2017].

Figura B1: Concentración de sal, ácido y base en el tiempo experimental inicial y final bajo diferentes concentraciones iniciales de NaCl.

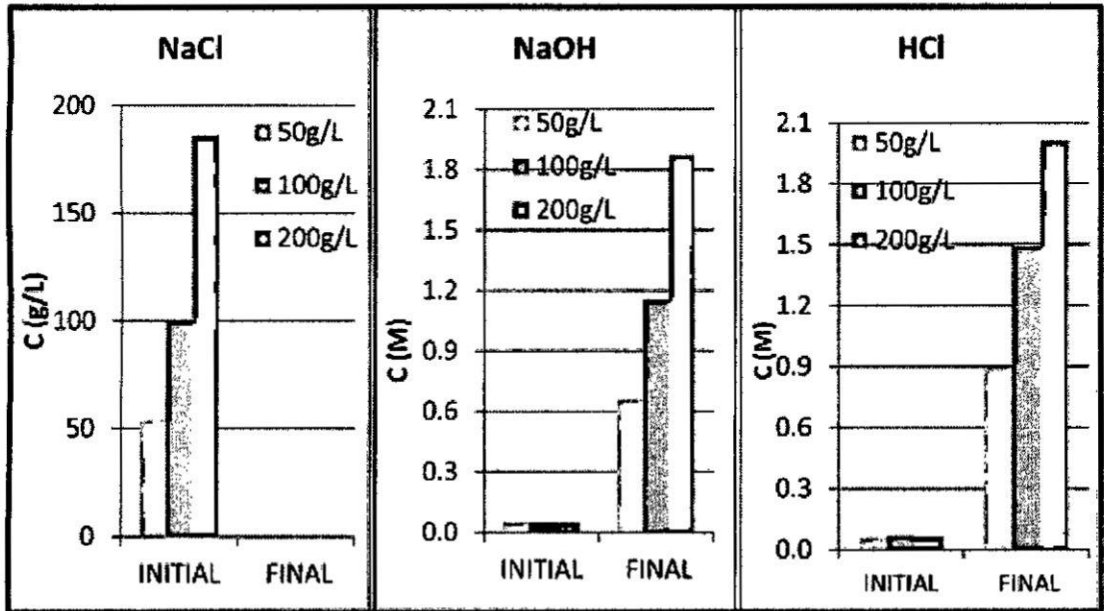


Fig. 6. Salt, acid and base concentration at the initial and final experimental time under different initial concentration of NaCl

Fuente: [M.Reig .S. Casas, Valderrama, O. Gibert. J .L .Cortina, 2016]

Figura B2: Concentración de sal, ácido y base en el tiempo experimental inicial y final bajo diferentes concentraciones iniciales de HCl y NaOH (0.05, 0.10 y 0.50 M). Usando NaCl nominal inicial concentración de a) 100 g / L y b) 200 g / L.

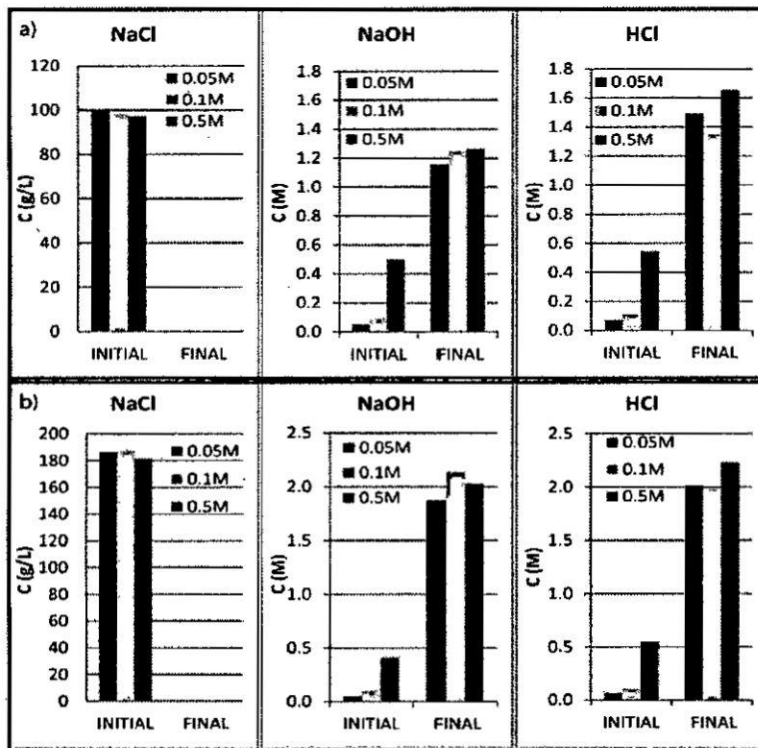


Fig. 5. Salt, acid and base concentration at the initial and final experimental time under different initial concentration of HCl and NaOH (0.05, 0.10 and 0.50 M). Using initial nominal NaCl concentration of a) 100 g/L and b) 200 g/L.

Fuente: [M.Reig, S. Casas, Valderrama, O. Gibert, J. L. Cortina, 2016].