UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE UN MÓDULO DE ELECTRODIÁLISIS PARA LA DESMINERALIZACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL PARQUE INDUSTRIAL DE AREQUIPA PARA ALIMENTACIÓN DE CALDERAS

Tesis presentada por:

MAMANI HUAMANI, SONIA LIZETH

ZARATE ZANALEA, ROLANDO RODOLFO

Para optar el Título Profesional de

INGENIEROS QUÍMICOS.

AREQUIPA – PERÚ

2021

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, por darme la vida y por darme la fortaleza para continuar en los momentos difíciles.

A mis padres Agustina y Juan por ser mí motivo más grande a conseguir mis sueños y metas, que con mucho amor y paciencia me han apoyado en cada paso de mi vida, a mis hermanos por sus consejos, su apoyo y haber depositado su confianza en cada decisión tomada. Se lo dedicó también a Gianmarcos, una persona querida y motivadora que en los momentos difíciles siempre tuvo una palabra de aliento y superación.

SONIA MAMANI.

Dedico esta tesis a mi madre que ha sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, lo cual me ha ayudado a seguir en los momentos difíciles.

A mi padre que desde el cielo guía mis pasos para seguir adelante.

También dedico a mis hermanas y demás familia en general por el apoyo que siempre me brindaron día a día.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a nuestros docentes por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión.

ROLANDO ZARATE.

Agradecimientos

Agradecemos a nuestra Universidad Nacional de San Agustín, a la Escuela Profesional de Ingeniería Química por abrirnos sus puertas y brindarnos los valores y conocimientos necesarios para ser mejores personas y sobre todo buenos profesionales, a nuestros docentes por sus sabias anécdotas y enseñanzas que nos han transmitido a lo largo de nuestra formación académica y haber inculcado la pasión por esta carrera.

Los autores.

Resumen

El presente trabajo de tesis tiene por objeto evaluar los parámetros de operación de un módulo de Electrodiálisis para el tratamiento de aguas de alimentación de calderas de procedencia subterránea del parque industria de Arequipa.

Debido a la crisis sanitaria dada por la covid-19,decretada el 15 de Marzo del 2020 por el gobierno nacional, y con ello el cierre y/o restricciones en algunas empresas del parque industrial de Arequipa, el presente proyecto de tesis tuvo limitaciones en la obtención de muestras de agua subterránea del sector activo del parque industrial de Arequipa, Por lo que se logró captar agua de la planta industrial de Cidasa, así como de otros puntos importantes de Arequipa como el distrito de Cerro Colorado(cc.pp. Pachacútec) y de Characato, ya que con fines de estudio éstas muestras cumplen con los parámetros de conductividad idóneos para ser tratados mediante el proceso de Electrodiálisis que lograron en su tratamiento los parámetros óptimos para su uso en Calderas.

Para llevar a cabo la experimentación se ha construido un módulo de Electrodiálisis tipo Filtro Prensa a nivel laboratorio, y se ha determinado la deficiencia del proceso de Electrodiálisis por medio de la densidad de corriente límite del proceso y parámetros de operación para obtener un agua desionizada y blanda, que cumple con las características de calidad de agua para calderas. El valor del corriente límite a partir de la curva de polarización V/I determinado fue de: 0.0625 Amp, 0.095 Amp. y 0.125 Amp. para un flujo de alimentación de diluido de 19.2 ml/min, 26.4 ml/min y 31.2 ml/min respectivamente. Como resultado de la electrodiálisis se obtuvo valores de des ionización y dureza de 99.13% y 2.17 mg/l respectivamente, considerándose un agua blanda y exenta de sales; los parámetros de operación óptimos fueron de Conductividad inicial de 0.55 mS/Cm, potencial eléctrico de 8V y flujo de alimentación de 31.2 ml/min.

Palabras claves: Electrodiálisis-Membrana iónica-Agua subterránea

Abstract

The present thesis research aims to evaluate the operating parameters of an Electrodialysis module for the treatment of boiler feed water from the industrial park of Arequipa.

Due to the sanitary crisis given by the covid-19, decreed on March 15, 2020 by the national government, and with it the closure and / or restrictions on some companies in the industrial park of Arequipa, this thesis project had limitations in obtaining groundwater samples from the active sector of the industrial park of Arequipa, so it was possible to capture water from the industrial plant of Cidasa, as well as other important points of Arequipa as the district of Cerro Colorado (cc. pp. Pachacútec) and Characato, since for study purposes these samples meet the conductivity parameters suitable to be treated by the electrodialysis process that achieved in its treatment the optimal parameters for use in boilers.

In order to carry out the experimentation, an Electrodialysis module type Filter Press has been built at laboratory level, and the deficiency of the Electrodialysis process has been determined by means of the process limit current density and operation parameters to obtain a deionized and soft water, which complies with the quality characteristics of water for boilers. The value of the limiting current from the V/I polarization curve determined was: 0.0625 Amp, 0.095 Amp and 0.125 Amp for a diluate feed flow rate of 19.2 ml/min, 26.4 ml/min and 31.2 ml/min respectively. As a result of the electrodialysis, deionization and hardness values of 99.13% and 2.17 mg/l respectively were obtained, considering the water to be soft and free of salts; the optimum operating parameters were: initial conductivity of 0.55 mS/Cm, electrical potential of 8V and feed flow of 31.2 ml/min.

Keywords: Electrodialysis-Ion membrane-Groundwater

Índice

Dedicatoria I
Agradecimientos II
Resumen III
Abstract IV
Índice de Tablas VII
Índice de Figuras IX
Índice de Anexos XI
CAPÍTULO 1 12
Fundamento de la Investigación 12
1.1. Introducción 12
1.2. Título de la Investigación 14
1.3. Tipo de Investigación 15
1.4. Área en el que Inscribe 15
1.5. Responsable del Proyecto 15
1.6. Planteamiento del Problema 15
1.7. Objetivos de la Investigación. 16
1.7.1. Objetivo General 16
1.7.2. Objetivos Específicos 16
1.8. Hipótesis de la Investigación 16
1.9. Justificación de Investigación 16
1.9.1. Justificación Técnica 16
1.9.2. Justificación Ambiental 17
1.10. Análisis de Variables 17
1.11. Técnicas e Instrumentos de Investigación 18
CAPITULO II 19
Marco Teórico 19
2.1. Antecedentes 19
2.1.1. Internacional 19
2.1.2. A nivel Nacional 20
2.2. Bases Teóricas 23
2.2.1. Agua Subterránea 23
2.2.2. Calderas 26
2.3. Tecnologías del Tratamiento de Agua en Calderas 46
2.3.1. Tecnologías de Intercambio Iónico 49
2.3.2. Tecnología de la Osmosis Inversa Aplicada a Sistemas de Generación de Vapor 54

2.3.3. Tecnología de la Electrodesionización- Electrodiálisis 56
2.4. Proceso de Separación por Electrodiálisis 61
2.4.1. Electrodiálisis de Polaridad Reversible (EDR) 63
CAPITULO III 86
Materiales y Métodos 86
3.1. Descripción de la Celda de Electrodiálisis 86
3.1.1. Equipo Experimental 87
3.2. Materiales e Instrumentos de Medición: 91
3.3. Metodología de la Experimentación 94
3.3.1. Recolección de Muestras 94
3.3.2. Procedimiento de Operación del Módulo 95
3.4. Diseño Experimental Taguchi 97
3.4.1. Matriz de Experimentos 99
3.4.2. Procesamiento de Datos 99
3.5. Procedimiento para la Determinación de la Densidad de Corriente 99
3.6. Procesamiento para la Determinación del Porcentaje de Desalinización 100
CAPITULO IV 101
Presentación y Análisis de Resultados 101
4.1. Determinación de Corriente Limite 101
4.2. Determinación de Conductividad del Tanque de Diluido en Función del Tiempo de Operación 103
4.3. Análisis e Interpretación de Resultados 108
Conclusiones 111
Recomendaciones 112
Bibliografía 113
Anexos 116

Índice de Tablas

Tabla 1 Variables Independientes 17

Tabla 2 Variables Dependientes 18

Tabla 3 Impurezas Más Comunes en el Agua y el Posible Efecto en la Alimentación de Calderas ... 27

Tabla 4 Principales Impurezas del Agua y sus Efectos. 31

Tabla 5 Norma UNE 9-075-78. 33

Tabla 6 Valores Guía Para Calderas Acuotubulares 34

Tabla 7 Agua de Alimentación Para Calderas e Vapor (Excepto El Agua de Pulverización del Desrecalentador) y Calderas de Agua Caliente 37

Tabla 8 Agua de la Caldera Para Calderas de Vapor Y Calderas de Agua Caliente 38

Tabla 9 Productos Químicos Regenerantes 50

Tabla 10 Tipos de Resina 51

Tabla 11 Especificaciones Típicas De Las Membranas De Intercambio Iónico 76

Tabla 12 Parámetros De Operación Típicos Para Las Unidades De Electrodiálisis 80

Tabla 13 Características De Las Membranas. 87

Tabla 14 Composición Inicial De Aguas Subterráneas 95

Tabla 15 Diseño De Experimentos Taguchi 98

Tabla 16 Arreglo Ortogonal L9 98

Tabla 17 Matriz De Experimentos. 99

Tabla 18 Lectura De Intensidad De Corriente Y Voltaje Con Flujo De Alimentación De 19.2 Ml/Min Y Conductividad Inicial De 1.28 Ms/Cm. 101

Tabla 19 Lectura De Intensidad De Corriente Y Voltaje: Flujo De Alimentación Del Diluido De 26.4 Ml/Min Y La Conductividad Inicial De 1.28 Ms/Cm. 101

Tabla 20 Lectura De Intensidad De Corriente Y Voltaje: Flujo De Alimentación Del Diluido De 31.2 Ml/Min Y La Conductividad Inicial De 1.28 Ms/Cm 102

Tabla 21 Comparativa de composición inicial y final de aguas subterráneas 108

Tabla 22 Porcentaje de deionización 108

Tabla 23 Tabla de Respuesta para medias 109

Tabla 24 Conductividad vs tiempo a las condiciones de operación conductividad 0.44 ms/cm, potencial 4 V y flujo 19.2 ml/ min. 116

Tabla 25 Conductividad vs tiempo a las condiciones de operación de conductividad 0.44 ms/cm, potencial 8 V y flujo 26.4 ml/ min. 117

Tabla 26 Conductividad vs tiempo a las condiciones de operación de conductividad 0.44 ms/cm, potencial 12 V y flujo 31.2 ml/ min. 118

Tabla 27 Conductividad vs tiempo a las condiciones de operación de conductividad 0.55 ms/cm, potencial 4V y flujo 26.4 ml/ min. 119

Tabla 28 Conductividad vs tiempo a las condiciones de operación de conductividad 0.55 ms/cm, potencial 8V y flujo 31.2 ml/ min. 121

Tabla 29 Conductividad vs tiempo a las condiciones de operación Conductividad 0.55 ms/cm, potencial 12V y flujo 19.2 ml/ min. 122

Tabla 30 Conductividad vs tiempo a las condiciones de operación Conductividad 1.28 ms/cm, potencial 4 V y flujo 31.2 ml/ min. 123

Tabla 31 Conductividad vs tiempo a las condiciones de operación conductividad 1.28 ms/cm, potencial 8 V y flujo 19.2 ml/ min. 124

Tabla 32 Conductividad vs tiempo a las condiciones de operación Conductividad 1.28 ms/cm, potencial 12 V y flujo 26.4 ml/ min. 125

Índice de Figuras

Figura 1 Algoritmo de trabajo..... 18

Figura 2 Zona Saturada y No Saturada..... 24

Figura 3 Corrida Superior de los Tubos de Humo de unaCcaldera..... 43

Figura 4 Incrustaciones acumuladas en una caldera..... 43

Figura 5 Cámara de vapor de una caldera..... 45

Figura 6 Comparación de Costos Estimados de Operación basados en el tamaño de la planta..... 46

Figura 7 Costos de Desalinización del Agua Salina en función a la concentración de la Solución de alimentación..... 47

Figura 8 Diagrama Esquemático de los principios de operación de la Ósmosis Inversa y la Electrodiálisis..... 48

Figura 9 Diagrama de perdidas irreversibles de energía en Ósmosis Inversa y Electrodiálisis..... 49

Figura 10 Desmineralizador de Doble Lecho por Intercambio Iónico..... 52

Figura 11 Procesos de Ósmosis y Ósmosis Inversa..... 54

Figura 12 Componentes de una batería de un sistema de Electrodesionización..... 58

Figura 13 Sistema de Electro deionización..... 58

Figura 14 Diagrama de Flujo Típico de un Sistema de Electrodesionización..... 60

Figura 15 Principios de la Electrodiálisis..... 61

Figura 16 Electrodiálisis convencional. Módulo de membranas con ánodo y cátodo..... 62

Figura 17 Migración de los iones dentro de las membranas del módulo..... 63

Figura 18 Esquema del proceso de electrodiálisis reversible..... 64

Figura 19 Partes que componen un módulo de membrana..... 65

Figura 20 Flujo de agua en los separadores..... 66

Figura 21 Módulo de Electrodiálisis..... 68

Figura 22 Diagrama esquemático de las cargas de una MII..... 71

Figura 23 Diagrama esquemático del paso de iones a través de una celda de electrodiálisis empleando una: (a) MIC, (b) MIA, (c) y (d) ejemplos de celdas que emplean MIC y MIA..... 72

Figura 24 Representación de Curva de polarización 73

Figura 25 Diagrama de una unidad de electrodiálisis de 2 líneas y 3 etapas en serie 79

Figura 26 Gradiente de concentración en la interfase membrana-disolución, bajo el efecto de un campo eléctrico. MA y MC: membranas de intercambio aniónico y catiónico. X-: anión. M+: catión. A: anolito. C: catolito. B: disolución acuosa de una sal XM. 81

Figura 27 Curva de Polarización 85

Figura 28 Celdas de Equipo Experimental 87

Figura 29 Membrana de intercambio catiónica y aniónica. 88

Figura 30 Electrodos 88

Figura 31 Espaciadores 89

Figura 32 Placa de sellado de espaciadores 90

Figura 33 Cuadro metálico y tensores. 90

Figura 34 Bombas peristálticas de dos canales 91

Figura 35 Conductímetro 92

Figura 36 Multímetro 93

Figura 37 Fuente de alimentación 94

Figura 38 Diagrama de celdas de equipo experimental 96

Figura 39 Etapas del método de Taguchi 97

Figura 40 Potencial eléctrico (V) vs. Intensidad de corriente (mA). 103

Figura 41 Conductividad (mS/cm) Vs Tiempo (min) – Corridas 1,2,3. 104

Figura 42 Conductividad (mS/cm) Vs Tiempo (min) - Corridas 4,5 y 6. 105

Figura 43 Conductividad (mS/cm) Vs Tiempo (min) - Corridas 7,8,9. 107

Figura 44 Gráfica de efectos principales para Medias 109

Figura 45 Módulo de electrodiálisis 145

Figura 46 Ensamble de Bombas peristálticas 145

Figura 47 Ensamble de celda de equipo experimental 146

Figura 48 Medición de conductividad del agua producto. 146

Índice de Anexos

Anexo 1: Determinación de la conductividad del tanque de diluido en función del tiempo de operación*:* **116**

Anexo 2: Informe de análisis fisicoquímico de agua subterránea **127**

Anexo 3: Informe de análisis fisicoquímicos de agua subterránea tratada por electrodiálisis **136**

Anexo 4: Imágenes de operación de equipo experimental a nivel laboratorio **145**

CAPÍTULO 1

Fundamento de la Investigación

1.1. Introducción

La electrodiálisis es una técnica basada en el transporte de iones a través de membranas selectivas bajo la influencia de un campo eléctrico. Mediante este proceso se consigue separar iones o moléculas cargadas. La concentración de los componentes de la alimentación se basa en la migración eléctrica a través de membranas iónicas. Los iones van a ser transferidos desde la solución menos concentrada a la más concentrada. Una de las ventajas más atractivas que presenta es que requiere temperaturas suaves.

El proceso que tiene lugar es el siguiente:

- Los cationes serán atraídos por el cátodo (electrodo negativo) y tendrá lugar una reacción de reducción.
- Los aniones serán atraídos por el ánodo (electrodo positivo) y tendrá lugar una reacción de oxidación.
- En cuanto a las membranas, existen dos tipos:
- Membranas de transferencia catiónica: sólo permite el paso de los cationes.
- Membranas de transferencia aniónica: sólo permite el paso de los aniones.

En general, se utilizan cientos de compartimentos desmineralizados y concentrados en una pila de membranas para así obtener el caudal requerido. Esta pila constituye la parte más importante del proceso de electrodiálisis.

Características del proceso de electrodiálisis:

Utiliza energía eléctrica

- Las membranas son impermeables (impiden el paso del agua)
- El consumo energético es directamente proporcional a la cantidad de sales eliminadas.

- La eliminación de sales por esta es del 40-50%.
- Solo elimina partículas cargadas.
- Las pérdidas de agua son bajas (5-20%)
- No suele requerir productos químicos. En caso de hacerlo, se añaden a la salmuera.
- Presenta un elevado coste de la instalación, pero bajo coste de operación.

Cada pila está formada por los siguientes componentes:

- Electrodos
- Membranas
- Promotores de turbulencia
- Cuerpos de la celda
- Juntas
- Distribuidores de flujo o separadores
- Rectificador

La ED hoy en día es utilizada ampliamente para la desalación del agua salobre y, en algunas zonas del mundo, es el proceso principal para la producción de agua potable. Aunque de mayor importancia. la desalación del agua y producción de sal de mesa no son las únicas aplicaciones significativas (Leitz, 1976; Leitz y Eisenrnann, 1981). El desarrollo del nuevo intercambio jónico de membrana con mejores selectividades, menor resistencia eléctrica y con propiedades térmicas, químicas y mecánicas mejoradas ha generado recientemente un gran interés en las aplicaciones de la ED, especialmente en las industrias de la alimentación, medicamentos y procesos químicos, así como en biotecnología y en el tratamiento de aguas residuales (Korngold, 1984; Escudier, Cottereau y Montounet, 1989).

La ED en el sentido clásico puede utilizarse para llevar a cabo varios tipos de separación general, tales como la separación y concentración de sales, ácidos y bases de soluciones acuosas (Nishiwaki, 1972; Korngold, 1978, Schoeman y van Staden, 1991; Sehoeman, 1992),

la separación de iones monovalentes de iones polivalentes y múltiples componentes cargados (Nishiwaki, 1972) y la separación de componentes iónicos de moléculas no cargadas (Ahlgren, 1972a, 1972b). La ED ligeramente modificada se usa todavía para separar mezclas de aminoácidos o incluso proteínas (Strathmann, 1992). La electrodiálisis también se usa para producir ácidos y bases de las sales correspondientes, cuando se combina con la disociación de agua eléctricamente forzada en las membranas bipolares (Mani, 1991).

En muchas aplicaciones, la ED está en competencia directa con otros procesos de separación como destilación, intercambio iónico, ósmosis inversa y varios procedimientos cromatográficos, Para ciertas aplicaciones hay muy pocas alternativas económicas a la ED. Aunque este proceso es conocido en principio desde hace más de ochenta años, la utilización a escala industrial comenzó hace veinticinco años. La ED clásica o estándar unidireccional se desarrolló durante los años cincuenta. Sin embargo, durante las dos décadas y media pasadas la característica principal ha sido el desarrollo del proceso de polaridad inversa que se conoce como electrodiálisis inversa (EDI) (Katz, 1977). Esta técnica ha desplazado virtualmente a la ED unidireccional de la mayoría de las aplicaciones de agua salobre y ha ganado un significativo cupo en este mercado (Katz, 1977). El último énfasis en el desarrollo de la ED es la aplicación de ED bipolar para recuperación de recursos y control de la contaminación (Mani, 1991; Scott, 1990).

1.2. Título de la Investigación

El presente proyecto se titula “EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE UN MÓDULO DE ELECTRODIÁLISIS PARA LA DESMINERALIZACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL PARQUE INDUSTRIAL DE AREQUIPA PARA ALIMENTACIÓN DE CALDERAS”.

1.3. Tipo de Investigación

Investigación Tecnológica

1.4. Área en el que Inscribe

Electroquímica

1.5. Responsable del Proyecto

Bachilleres en Ingeniería Química:

- Sonia Lizeth Mamani Huamani
- Rolando Zarate Zanalea

1.6. Planteamiento del Problema

Existe una amplia variedad de procesos para el tratamiento de aguas para calderas, por lo general, se emplea tratamientos externos cuando la cantidad de una o varias impurezas del agua es elevada como para ser tolerada por la caldera en cuestión. El tratamiento del agua para la generación de calor mediante calderos se ha centrado básicamente en el agua de alimentación para estos equipos, mediante el desarrollo y mejora de las tecnologías para su pre tratamiento como el ablandamiento, des alcalinizado o desmineralizado de esta agua (Electrodiálisis), cuyo fin más importante es la eliminación de impurezas y sales poco solubles que son los principales responsables de la formación de depósitos, incrustaciones y corrosión en calderas.

La tecnología de electrodiálisis ya ha demostrado su viabilidad en el tratamiento de aguas residuales de diversos tipos, pero hasta ahora no se ha comprobado que tan efectivas serían en el tratamiento de aguas subterráneas para dicho fin, y más aún mediante un equipo tipo filtro prensa a nivel laboratorio, llegando a obtener parámetros que caractericen un agua para alimentación de calderas.

1.7. Objetivos de la Investigación.

1.7.1. Objetivo General

Evaluar los parámetros de operación de un módulo de Electrodiálisis para el tratamiento de aguas de alimentación de calderas de procedencia subterránea del parque industrial de Arequipa.

1.7.2. Objetivos Específicos

- Construir un módulo de Electrodiálisis tipo Filtro Prensa a escala de laboratorio, que permita llevar a cabo la experimentación de desmineralización de agua de alimentación de calderas.
- Determinar los parámetros y niveles de operación del módulo de electrodiálisis a escala laboratorio.
- Determinar el porcentaje de desalinización en el módulo de electrodiálisis

1.8. Hipótesis de la Investigación

Se podrá obtener la desmineralización del agua subterránea por medio del módulo de electrodiálisis construido a escala laboratorio con los parámetros óptimos de operación y se presume que se podrá lograr mediante este proceso un alto porcentaje de deionización del agua que cumpla con las especificaciones que caracterizan a un agua para alimentación de calderas.

1.9. Justificación de Investigación

1.9.1. Justificación Técnica

La posibilidad de brindar una forma tecnológica poco común de tratar el agua subterránea del sector Parque Industrial de Arequipa para alimentar calderas. Busca comprobar la efectividad del proceso de Electrodiálisis en la obtención de un agua libre de metales y sales nocivas en equipos industriales, tales como Calderas de media y alta presión. El proceso de ELECTRODIÁLISIS es una opción de des ionización y purificación de aguas salobres y/o aguas que se encuentran en la última etapa de potabilización, que por su alta recuperación lo

convierte en una alternativa tecnológica para el tratamiento de aguas de diversos procesos en el ámbito Industrial. Además, que es una tecnología que nos permite hacer uso para el estudio de otros problemas industriales en diferentes campos.

1.9.2. Justificación Ambiental

El propósito de esta investigación es tratar aguas subterráneas para su aplicación en equipos industriales tales como Calderas, que, si bien es nuestro propósito, se busca resaltar también la importancia de la Electrodiálisis en la disminución o eliminación de metales y sales en las aguas subterráneas que hoy en día lo constituyen en un riesgo permanente y potencial para la salud. Además, que por medio de este proceso se puede tratar aguas residuales provenientes del sector industrial, para su reutilización en sus mismos procesos, o para ser emitidos dentro de los límites máximos permisibles a los drenajes de desagüe**.**

1.10. Análisis de Variables

- Variables Independientes:

Tabla 1

Variables Independientes

Nombre De La Variable	Símbolo	Unidad
Potencial eléctrico	V	Volt
Flujo de alimentación	Qa	ml/min
Conductividad inicial del agua de subsuelo	σ_o	uS
Tiempo de tratamiento	t	min

Fuente: Elaboración propia.

- Variables Dependientes:

Tabla 2

Variables Dependientes

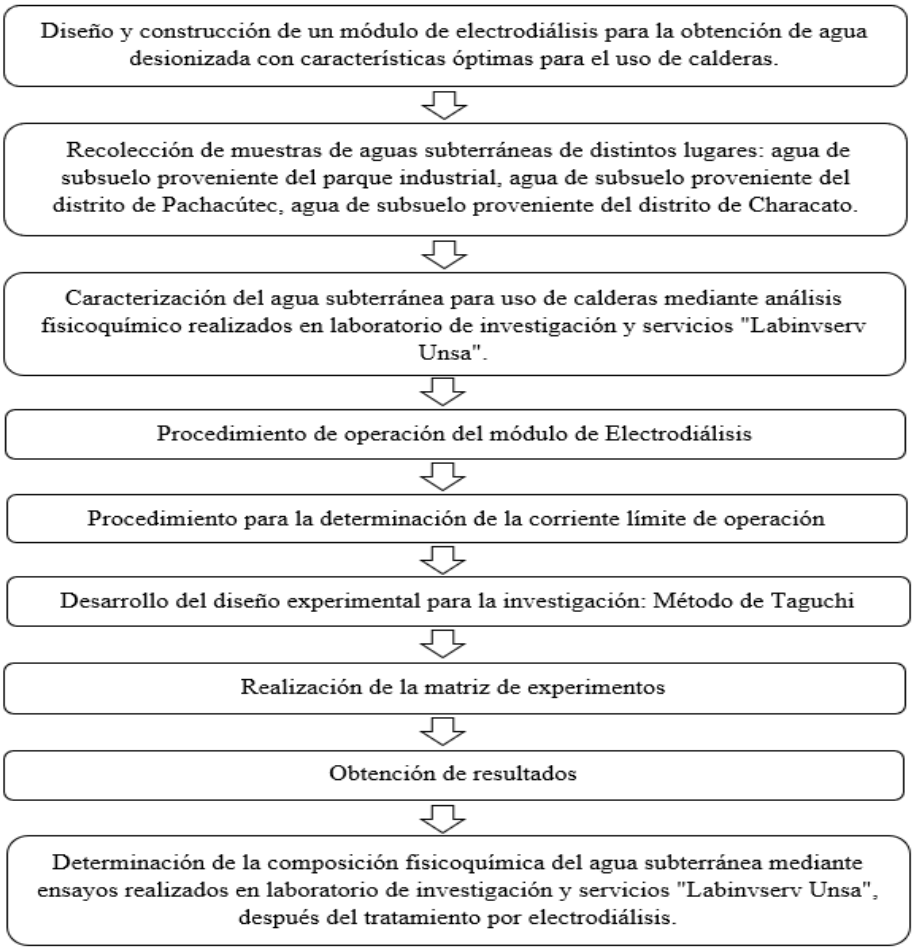
Nombre De La Variable	Símbolo	Unidad
Conductividad medida en el tiempo (agua desmineralizada)	σ	uS
Intensidad eléctrica	I	Amp
Consumo energético		Kw.h
Porcentaje de des ionización	%D	---

Fuente: Elaboración propia.

1.11. Técnicas e Instrumentos de Investigación.

Figura 1

Algoritmo de Trabajo



Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO II

Marco Teórico

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacional

Casells (2014). En su proyecto de "Recuperación electrolítica de Cr (VI) mediante el uso de reactores electroquímicos en presencia de membranas cerámicas modificadas con óxidos de zirconio. (Trabajo de fin de grado). Universidad Politécnica de Valencia. España. El objetivo de investigación fue realizar el estudio de la recuperación del cromo presente en efluentes industriales mediante la técnica de electrodiálisis, básicamente estudia las propiedades de membranas cerámicas de intercambio aniónicas que se han diseñado combinando las ventajas de los materiales cerámicas y las propiedades selectivas de las membranas de intercambio iónico convencionales , se realizaron un estudio del efecto de la intensidad aplicada , siendo muy elevada se produce el transporte de otros iones, es decir, un aumento de la corriente impuesta facilita el paso de otras especies indeseables para este estudio, por ello a mayor intensidad aplicada, mayor proporción de ésta es utilizada en facilitar el paso de otros iones y por tanto menor proporción se utiliza para que pase el Cr(VI). Por otra parte, se refleja que la evolución de la productividad trabajando con intensidad de 0,4A es mayor que la evolución para una intensidad de 0,25A, es decir, mayor productividad cuanta mayor corriente se suministra al sistema. Si aumenta la intensidad aplicada, aumenta la velocidad de paso y con ello el transporte de aniones de Cr(VI) a través de la membrana aniónica, aumentando con ello la productividad del sistema a intensidades más elevadas. Una de las conclusiones es que los valores de conversión tanto del níquel como del cromo aumentan con la intensidad aplicada.

Finalmente, en la investigación se consiguió eliminar el Cr(VI) y el Ni(II) del compartimento central y concentrar en el ánodo y cátodo respectivamente.

Gonzales et al. (2008). Diseño de procesos de desalinización de aguas subterráneas salobres mediante simulación química de electrodiálisis reversible, con propósito de consumo humano. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales. México. Aplicó un modelo matemático de simulación de EDR (electrodiálisis reversible) con el objetivo de estimar parámetros de diseño real y evaluar la factibilidad de implementarlos en dos comunidades con problemas de salinidad. La metodología consistió en procesar datos fisicoquímicos de agua de las comunidades, con esos datos se utilizó el software WatSys 2.1 de Ionics y MatLab 7.0.1 de MathWorks. los cuales fueron usados para simular los parámetros óptimos del agua producto del proceso, el tamaño de la planta de EDR respectivamente, además de la determinación de los parámetros de eficiencia de remoción y se estableció el cálculo de un diseño real que abastecerá a las comunidades seleccionadas en volumen y calidad apropiada para el consumo humano, con proyección hasta el año 2030. Al agua tratada se le comparó con parámetros que exigen las normas de agua potable. El caso más crítico de salinidad se presentó en Las Águilas con 18,200 mg l -1 STD en la entrada y se simulo hasta que cumplió con la norma mexicana de agua potable NOM-0127-SSA-1994.

2.1.2. A nivel Nacional

Castillo y Lucas (2015). Evaluación de los parámetros operacionales en un equipo de electrodiálisis para recuperación de iones de níquel a partir de efluentes galvánicos (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, Perú.

En el presente trabajo de investigación se determinó los parámetros de operación adecuados en un equipo de electrodiálisis a nivel de laboratorio, para la recuperación de iones níquel provenientes de las aguas de enjuague del proceso de niquelado. Se utilizó soluciones sintéticas semejantes a los fluidos de la galvanoplastia y soluciones reales como fluidos a tratar a diferentes concentraciones aplicando la metodología Taguchi. Así mismo, se determinó que los parámetros de operación óptimos del proceso para ambas soluciones fueron: flujo de

alimentación 600 ml/min, concentración inicial de 50 ppm de sulfato de níquel, 0.03 M de concentración de sulfato de sodio en el lavado de electrodos y el potencial eléctrico fue de 15 V, los cuales permitieron establecer que los resultados de recuperación fueran muy similares para la solución sintética y la solución real.

Se obtuvo resultados a nivel laboratorio que permitió obtener los parámetros óptimos de operación en un equipo de electrodiálisis los cuales requieren un elevado voltaje, una baja concentración de sulfato de níquel y una concentración intermedia de lavado de electrodos, estos parámetros determinaron para alcanzar los mayores porcentajes de recuperación de iones níquel trabajando con soluciones sintéticas y reales como efluentes galvánicos.

La variable de mayor influencia en el sistema fue el Potencial eléctrico, al incrementarse permitió alcanzar los mayores porcentajes de recuperación de iones independientemente de los otros parámetros.

Medina (2015), en su investigación "Evaluación experimental de espaciadores de flujo en la transferencia de masa en un módulo de electrodiálisis reversible". (Informe de investigación). Callao, Perú. El objetivo de investigación fue elaborar y estudiar el comportamiento de los espaciadores en el transporte de masa frente a los parámetros de operación del módulo de electrodiálisis. Donde se construyó tres tipos de espaciadores de diferentes geometrías y se estudió su efecto frente al transporte de masa de los iones. Se estudió la influencia de los parámetros de operación, voltaje, flujo, concentración de alimentación de cloruro de sodio con respecto al transporte de masa.

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

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

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

El equipo experimental constó de los siguientes elementos: 3 tanques de material acrílico de capacidad de 2 litros (13 cm de diámetro y 27 m de altura), una estructura metálica de hierro fundido pintado de color azul, 3 bombas de 0,25 HP, válvulas de paso para controlar el flujo de la solución, conectores rápidos con entrada manguera/manguera, codos de plástico de 10 mm de diámetro, 3 Transformadores de 150 watts 110 voltios, 3 membranas de intercambio iónico. Los resultados mostraron que el espaciador tipo C es el más adecuado, obteniéndose el mayor coeficiente de transferencia de masa en el equipo de electrodiálisis.

Medina (2009). Desarrollo de módulos de electrodiálisis para la desalinización de aguas salobres, determinación de parámetros físicos y evaluación experimental de modelo difusional. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. Cuyo objetivo de la investigación fue el diseño - construcción del módulo de electrodiálisis y la evaluación de los parámetros de operación del proceso en la desalinización de agua salobre.

El módulo de electrodiálisis construido, mostró un buen funcionamiento de operación en la desalinización del agua salobre, el uso de marcos de menor espesor presentó la mejor alternativa de operación, dando como resultado un mayor porcentaje de desalinización.

Se construyó un proceso de electrodiálisis y a nivel experimental, se determinó la densidad de corriente límite, a través de la curva de polarización, utilizando soluciones sintéticas semejantes al agua salobre.

Así mismo, mediante el diseño experimental de la metodología Taguchi, se estudió la influencia de los parámetros de operación tales como: Concentración de alimentación, potencial eléctrico, flujo y distancia entre membrana catiónica y aniónica en el porcentaje de desalinización, se observó que la densidad de corriente límite, aumentó en forma directa con la concentración y flujo de la corriente diluida, de igual forma se ha comprobado que la celda que resulta de mayor porcentaje de desalinización es cuando la distancia entre membrana catiónica y membrana anionica es de 4 mm. Con los parámetros de operación de 18 voltios, cuya concentración es de 1000 ppm y 500mL/min.

De la investigación se puede considerar importantes aspectos sobre el proceso de desalación por medio del cual se eliminan las sales y minerales disueltos en el agua de mar o en aguas salobres, a fin de obtener agua dulce apta para el consumo de los seres vivos y procesos industriales.

2.2. Bases Teóricas

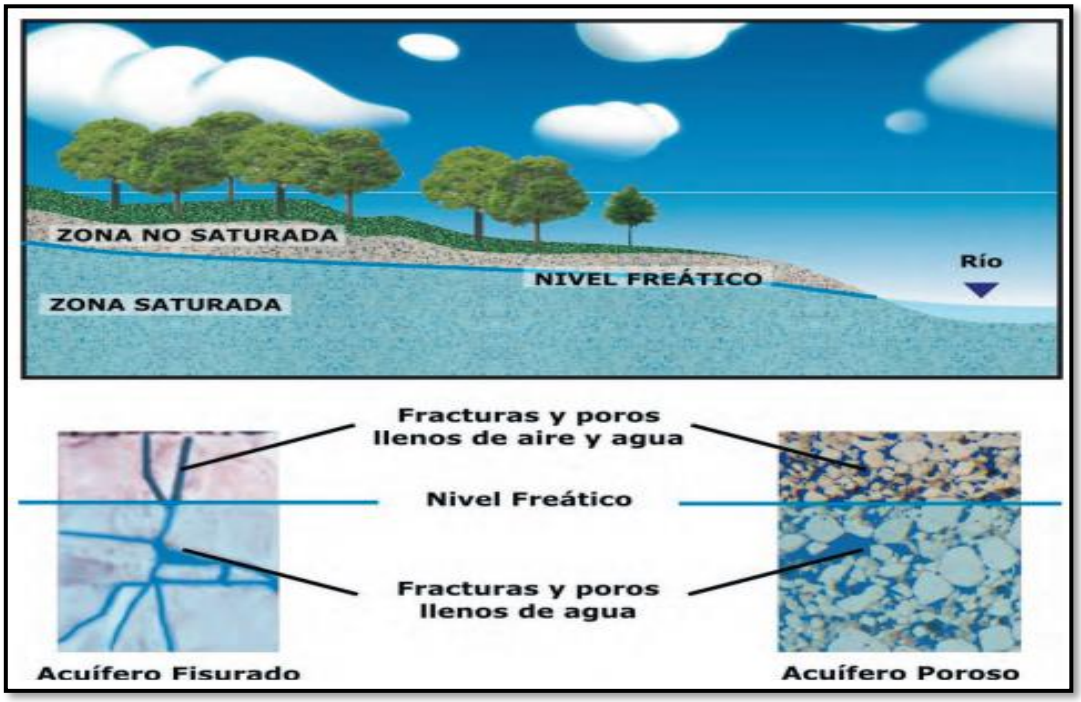
2.2.1. Agua Subterránea

Collazo y Montaño (2012). En su investigación titulado "*El agua subterránea"* (*Manual de Agua subterránea),* señala que el agua que se aloja y circula en el subsuelo, conformando los acuíferos. La fuente de aporte principal es el agua de lluvia, mediante el proceso de infiltración. Otras fuentes de alimentación localizada pueden ser los ríos, arroyos, lagos y lagunas.

El agua subterránea se sitúa por debajo del nivel freático y está saturando completamente los poros y/o fisuras del terreno y fluye a la superficie de forma natural a través de vertientes o manantiales o cauces fluviales. (Fig. 2). Su movimiento en los acuíferos es desde zonas de recarga a zonas de descarga, con velocidades que van desde metro/año a cientos de m/día, con tiempos de residencia largos resultando grandes volúmenes de almacenamiento. (p.16)

Figura 2

Zona Saturada y No Saturada



Fuente: (Collazo y Montaño, 2012, p. 16)

2.2.1.1. Características Químicas del Agua Subterránea. Collazo y Montaño (2012), conocer los componentes disueltos o en otras formas del agua subterránea es una de las características más importantes a determinar. La presencia y concentración de determinados compuestos hace que el agua subterránea se diferencie de otras. Los procesos y factores que influyen en la evolución de la calidad de las aguas subterráneas pueden ser intrínsecos o extrínsecos al acuífero. En principio, el agua subterránea tiende a aumentar las concentraciones de sustancias disueltas a medida que se infiltra y aumenta su recorrido en los distintos acuíferos. Además de otros factores que interfieren en la composición del agua, como clima, composición del agua de recarga, tiempo de contacto del agua con el medio físico, etc., además de la contaminación causada por el hombre. (p.26)

Características Físicas: Collazo y Montaño (2012) menciona:

- **Temperatura:** poco variable y responde a la media anual de las temperaturas atmosféricas del lugar. En profundidad depende del gradiente geotérmico, que aumenta 1º cada 30m de profundidad.
- **Conductividad eléctrica:** Es la medida de la facilidad de un agua para conducir la corriente eléctrica y su valor aumenta con el tenor de sales disueltas en forma de iones. En aguas subterráneas los valores de conductividad son del orden de 10^{-6} mhos/ cm, o micromho/cm (mhos/cm a 25ºC). Este parámetro aumenta con la temperatura.
- **Color**: Es el resultado de las sustancias disueltas en agua, principalmente provenientes de la disolución de la materia orgánica.
- **Olor y sabor**: Están íntimamente relacionados entre sí y frecuentemente lo que se llama “gusto” es realmente percibido como olor. Son parámetros subjetivos, pero en general se puede decir que aguas con más de 300 mg/l de cloruros tienen sabor salado, con más de 400 mg/l de SO_4^{-2} tienen sabor salado y amargo, etc.

- **Turbidez:** es la dificultad del agua para transmitir la luz y se debe a la presencia de sólidos en suspensión (limos, arcillas, materia orgánica, etc) que dificultan el pasaje de la luz. (p.26)

2.2.2. Calderas

2.2.2.1. Agua para Alimentación de Calderas. Ortiz & Talavera (2013**).** El agua, es una de las sustancias más abundantes de nuestro planeta, sin embargo, nunca se localiza en estado puro, por le general el agua se encuentra se encuentra turbia, con materias sólidas en suspensión. Tratándose del fluido de trabajo de los sistemas de vapor debe de ser un agua apropiada, la cual es difícil de obtener, excepto mediante purificación artificial, con la que se logra eliminar en su mayor parte las impurezas capaces de originar incrustaciones, corrosión u otros efectos no deseables, adecuándola así, para la alimentación directa de una caldera.

Las exigencias de la calidad del agua para la alimentación han crecido con respecto a los nuevos sistemas de generación de vapor, lo que por consecuencia trae el requerimiento de un agua prácticamente pura para las modernas calderas de alta presión. La composición del agua que se alimenta a la caldera debe ser tal, que las impurezas presentes en la misma se puedan concentrar un número razonable de veces dentro del sistema, sin que por ello se superen los límites permitidos por el fabricante. (p.27)

A continuación, en la tabla 3 aparecen las impurezas más comunes en el agua y los posibles problemas que pueden ocasionar en las calderas.

Tabla 3

Impurezas Más Comunes en el Agua y el Posible Efecto en la Alimentación de Calderas

Constituyente	Fórmula Química	Fuente Principal Del Contaminante	Efecto Posible Cuando Se Encuentra Presente En Aguas De Caldera	Tratamiento Para Removerlo Del Agua
Sólidos en suspensión	-----	Drenado superficial, residuos industriales	Arrastres, espumas, lodos o incrustación.	Sedimentación, coagulación, filtración evaporación.
Sílice	SiO2	Depósitos minerales	Incrustación	Sedimentación, coagulación, filtración, evaporación, intercambio iónico.
Carbonato de calcio	CaCO3	Depósitos minerales	Incrustación	Ablandamiento con productos químicos, intercambio iónico, evaporación.
Bicarbonato de calcio	Ca (HCO3)2	Depósitos minerales	Incrustación	Ablandamiento por calentamiento con productos químicos, intercambio iónico, evaporación
Sulfato de calcio	CaSO4	Depósitos minerales	Incrustación, corrosión	Ablandamiento con productos químicos, intercambio iónico, evaporación.

Constituyente	Fórmula Química	Fuente Principal Del Contaminante	Efecto Posible Cuando Se Encuentra Presente En Aguas De Caldera	Tratamiento Para Removerlo Del Agua
Cloruro de calcio	$CaCl_2$	Depósitos minerales	Incrustación	Ablandamiento con productos químicos, intercambio iónico, evaporación.
Carbonato de magnesio	$MgCO_3$	Depósitos minerales	Incrustación	Ablandamiento con productos químicos, intercambio iónico, evaporación.
Bicarbonato de magnesio	$Mg(HCO_3)_2$	Depósitos minerales	Incrustación	Ablandamiento con productos químicos, intercambio iónico, evaporación.
Cloruro de magnesio	$MgCl_2$	Depósitos minerales	Incrustación, corrosión	Ablandamiento con productos químicos, intercambio iónico, evaporación.
Ácidos libres	HCl, H_2SO_4	Drenaje de minas, residuos industriales	Corrosión	Neutralización, seguida en ocasiones de ablandamiento o evaporación.
Cloruro de sodio	$NaCl$	Aguas negras, residuos industriales, depósitos minerales.	Inerte, pero puede ser corrosivo bajo ciertas condiciones.	Evaporación y desmineralización (intercambio iónico).

Constituyente	Fórmula Química	Fuente Principal Del Contaminante	Efecto Posible Cuando Se Encuentra Presente En Aguas De Caldera	Tratamiento Para Removerlo Del Agua
Carbonato de sodio	Na2CO3	Depósitos minerales	Arrastre, espuma.	Evaporación y desmineralización (intercambio iónico).
Bicarbonato de sodio	NaHCO3	Depósitos minerales	Arrastre, espuma.	Evaporación y desmineralización (intercambio iónico).
Oxigeno	O2	Absorción de la Atmosfera	Corrosión	Desaireación
Grasa y aceite		Residuos industriales	Corrosión, depósitos, arrastre, espuma.	Coagulación, filtración, evaporación, coalesción.
Materia orgánica y aguas negras		Residuos domésticos e industriales.	Corrosión, depósitos, arrastre, espuma.	Coagulación, filtración, evaporación.
Ácido carbónico	H2CO3	Absorción de la atmosfera, descomposición de materia orgánica, depósitos minerales.	Corrosión.	Desaereación

Fuente: (Ortiz & Talavera, 2013, pp. 28- 29).

2.2.2.1.1. Tratamiento del agua. Sincal calderas industriales, (2018). El agua de alimentación es uno de los aspectos más importantes que afectan a los generadores de vapor, tanto en su vida como en su funcionamiento.

Las aguas naturales contienen las siguientes impurezas:

- Gases en disolución (gas carbónico, oxígeno, etc.).
- Compuestos minerales (sales de calcio, de magnesio, de sílice y de sodio).
- Partículas inorgánicas en suspensión.
- Sustancias orgánicas en determinadas ocasiones

Estas impurezas pueden causar tres tipos de incidentes:

- Incrustaciones: Sobre las superficies de calefacción como hogar, placas, tubos, etc., dificultando la refrigeración del acero y, en consecuencia, la ruptura de algunos de estos elementos. Asimismo, disminución del intercambio de calor y por tanto pérdida de rendimiento y aumento del gasto de combustible.
- Corrosiones: Ataques químicos sobre las paredes, sobre todo en los lugares de poca circulación de agua, debido al oxígeno, ácidos, etc.
- Arrastres: De agua con el vapor que sale de la caldera.

Estos incidentes se pueden prevenir de la siguiente forma:

- Eliminando las sustancias nocivas contenidas en el agua.
- Añadiendo al agua reactivos capaces de convertir éstas en sustancias solubles e inofensivas.
- Controlando minuciosamente y detalladamente cada día la calidad del agua de alimentación y de la caldera. (pp. 2-3)

Tabla 4

Principales Impurezas del Agua y sus Efectos.

Impureza	Formula Química	Forma	Efectos
Dióxido de carbono	CO_2	Gas	Corrosión
Oxigeno	O_2	Gas	Corrosión
Materias en suspensión	-	Solidos no disueltos	Corrosión
Materias orgánicas	-	Solidos disueltos y no disueltos	Depósitos, espumas y arrastres
Aceites y grasas	-	Coloides	Depósitos, espumas y arrastres
Acidez	H+	Sales disueltas	Corrosión
Dureza	Ca**, Mg**	Sales disueltas	Incrustaciones
Alcalinidad	CO_3^-, CO_3H^-, OH^-	Sales disueltas	Espumas, arrastres, desprendimiento de CO_2, fragilidad caustica.
Salinidad (TDS)	-	Sales disueltas	Depósitos, espumas y arrastres
Cloruros	Cl^-	Sales disueltas	Aumento de salinidad y corrosividad
Sílice	SiO_2	Sales disueltas	Incrustaciones
Hierro, Manganeso	Fe, Mn	Sales disueltas o partículas	Depósitos
Cobre	Cu	Sales disueltas o partículas	Depósitos y corrosión

Fuente: (Sincal calderas industriales, 2018, p.2).

2.2.2.1.2. Tratamientos de agua para generadores de vapor.

Martínez (2012), la calidad del agua de alimentación a la caldera repercute directamente sobre el buen funcionamiento de la misma, así como sobre la vida de muchas de las partes y piezas que forman el equipo del generador de vapor. Para poder entender la importancia de la calidad del agua de alimentación de calderas, hay que conocer las características del agua, y las necesidades específicas que debe tener para ser usada en una caldera.Es muy raro que el agua disponible en una industria se obtenga de una captación propia o de una distribución municipal y que tenga la calidad suficiente para ser aplicada directamente en la generación de vapor. El tratamiento de aguas para calderas es una compleja rama de la química del agua. Se debe decir, que no existe ningún procedimiento simplista ni producto químico apropiado para el tratamiento de todas las clases de aguas. Cada caso se debe considerar individualmente. (p.4)

El objetivo de los tratamientos es reducir y evitar los tres principales problemas asociados a la generación de vapor:

- La formación de incrustaciones
- La corrosión
- Los arrastres

Para conseguir estos objetivos, el agua de aporte suele someterse a un tratamiento externo que reduzca la presencia de contaminante a un nivel conveniente. Para contrarrestar el efecto de los contaminantes residuales se añaden, además, los aditivos químicos apropiados.

La calidad del agua de alimentación y del agua interior de las calderas, está reguladas desde el punto de vista de seguridad de utilización del sistema.

En España, a partir de la Norma UNE 9-075-78, de la cual se ha elaborado la tabla 5.

En EE.UU. la ASME publica normas consensuadas de control de la calidad del agua de alimentación y de calderas, para las calderas industriales modernas. (pp. 11-12)

Tabla 5

Norma UNE 9-075-78.

Calderas de Tubos De Humo			
Presión máx. kg/cm^2	P = < 11	11>P=<17	P>17
Agua de alimentación			
Aspecto visual		Transparente sin color ni sedimentos	
Dureza en ºhf	=<1	=<0.6	=<0.2
pH a 20ºC	8.5	a	9.5
Materia orgánica mg/l		=<10	
Aceite mg/l	=<3	=<2	=<1
Agua del interior de las caleras			
Salinidad total mg/l	=<5000	=<4000	=<3000
Sólidos en suspensión mg/l	=<300	=<250	=<200
Alcalinidad total ml/l	=<1000	=<800	=<600
pH a 20ºC	9.5	a	11.5
Fosfatos en mg/l de P2O5	15-40		
Sílice mg/l de SiO_2	=>200	=<150	=<100
Calderas acuotubulares			

Agua de alimentación	Circulación natural o asistida				C. Forzada
Presión máx. kg/cm^2	=<20 20<P	=<20 20	<P =<40	40<P=<64	P>64
Aspecto visual			Transparente sin color ni sedimentos		
Dureza en ºhf	=<0.1	=<0.05	=<0.05	=<0.02	=<0.01
pH a 20ºC		8.0	a	9.5	
Materia orgánica mg/l	=<10	=<10	=<10	=<5	=<5
Aceite mg/l	=<1	=<1	=<0.5	=<0.5	=<0.3
Oxigeno mg/l			=<0.2		
CO2			no detecta		
CO2 combinado mg/l	=<20	=<20	=<20	=<1	=<1
Hierro mg/l	=<0.05	=<0.05	=<0.05	=<0.03	=<0.02
Cobre mg/l	=<0.01	=<0.01	=<0.01	=<0.005	=<0.005

Agua del interior de las caleras					
Presión máx. kg/cm^2					
Salinidad total mg/l	=<3000	=<2000	=<1500	=<750	=<125
Sólidos en suspensión mg/l	=<150	=<100	=<75	=<40	=<10
Alcalinidad total ml/l	=<600	=<400	=<300	=<150	=<30
pH a 20ºC	9.5 a 11.5				
Fosfatos en mg/l de P_2O_5	=<25	=<10	=<10	=<3	=<3
Sílice mg/l de SiO_2	=<140	=<50	=<10	=<4	=<1.2
La última columna aplica para P>160 excepto la sílice que debe ser de =<0.3					

Fuente: (Martínez, 2012, p.13. cita a RIGOLA, Miguel Tratamiento de aguas industriales aguas de proceso y residuales. p. 98.)

En la tabla 6 se muestran algunos de estos valores utilizados orientativamente en muchos países. No obstante, en último extremo, las garantías de funcionamiento requieren cumplir las especificaciones del fabricante de la caldera.

Tabla 6

Valores Guía Para Calderas Acuotubulares

Agua de Alimentación				Agua de Caldera			
Presión Kg/Cm^2	Dureza Ppm CO_3Ca	Hierro Ppm	Cobre Ppm	O_2 Ppm	Conductividad uS	Alcalinidad ppm CO_3Ca	Sio_2 Ppm
0-20	0.3	0.1	0.05	0.04	7000	700	150
20-30	0.3	0.05	0.025	0.04	6000	600	90
30-40	0.2	0.03	0.02	0.07	5000	500	40
40-50	0.2	0.025	0.02	0.07	4000	400	30
50-60	0.1	0.02	0.015	0.07	3000	300	20

Fuente: (Martínez, 2012, p.14 cita a RIGOLA, Miguel Tratamiento de aguas industriales aguas de proceso y residuales. p. 99.)

En una primera aproximación y para aguas de calidad regular, el ablandamiento es válido para calderas a baja presión, del orden de 10Kg⁄cm^2. Hasta 20 − 30 Kg⁄cm^2 puede ser

suficiente una desmineralización catión-anión, y por encima una desmineralización completa con un lecho mixto de pulido final.

Sin embargo, no se puede generalizar por la gran variedad de las aguas de partida y conviene realizar un estudio completo que contemple los criterios económicos propios del utilizador.

El tratamiento por intercambio iónico irá precedido de pretratamiento adecuado. Los sólidos en suspensión deben reducirse a unos 5 – 10 mg/L para evitar el ensuciamiento de las resinas. Los procesos indicados pueden ser la coagulación-floculación, la decantación y/o la filtración. Si la alcalinidad de partida es excesiva, una descarbonatación con cal la reducirá a unos 35 mg/L, y en el caso de exceso de dureza reducirá ésta en la misma medida que la alcalinidad. También quedarán reducidas la materia orgánica y, ligeramente, la sílice.

Si la materia orgánica en el agua de alimentación supera los 50 mg/L interferirá con la precipitación de la cal, a menos que se emplee una adsorción con carbón activo u oxidación química preliminar.

Si la cantidad de sólidos disueltos es inferior a 700 – 1000 mg/L se puede acudir directamente al intercambio iónico. Si es superior convendrá analizar el interés de una desalinización previa por ósmosis inversa. (p. 15)

2.2.2.1.3. ***Análisis del agua*.** Sincal calderas industriales (2018), el agua es muy dura cuando contiene sales de cal y de magnesio (en forma de bicarbonato) a la temperatura de ebullición (50 a 100ºC).

Para evitar estas incrustaciones, es necesario que agua de alimentación se determine:

- Título Hidrotimétrico (TH) o grado de dureza: Nos indica la dureza del agua. Hidrotimétrico del agua de alimentación sea inferior a 1 TH (grado francés), que corresponde a 10 gr. de carbonato de calcio (CO3Ca), por metro cúbico de agua.

- Título Alcalimétrico (TA) (p): Indica el grado de alcalinidad en el agua bajo forma de carbonato de sosa (CO_2Na) o sosa caustica, NaOH. Este análisis se reemplazará ventajosamente por el TAC.

  ITA= 50ppm NaOH=5p
- Título Alcalimétrico completo (TAC) (m): Mide el valor de la alcalinidad total del agua de la caldera y su concentración. El valor del TAC determina el porcentaje de purgas que deben efectuarse con objeto de evitar el fenómeno de arrastre y corrosión. Para una caldera a presión de trabajo de 8 Kg/cm², el TAC no debe sobrepasar los 1.400 mg/l. Cuanto más elevada es la presión, más bajo debe ser el TAC. 1 TAC = 50 PPM CO3Ca = 5m
- Potencia de Hidrógeno (pH): Es el número de iones de hidrógeno libres que hay en disolución, e indica la mayor o menor basicidad o acidez de ella. Así pues:

  Un pH< 7, es ácido.

  Un PH=7, es neutro

  Un PH>7,es alcalino
- Salinidad (T.S.D.): Expresa la concentración total de sales disueltas en el agua. Su unidad es el miligramo por litro, mg/l (1 mg/l = 1ppm).
- Sílice: La sílice presente en el agua de alimentación puede formar incrustaciones duras (silicatos) o de muy baja conductividad térmica (silicatos de calcio y magnesio).
- Conductividad: La conductividad del agua permite controlar la cantidad de sales (iones) disueltas en el agua. (pp. 3-4)

2.2.2.1.4. Valores recomendables del agua de alimentación. Sincal calderas industriales (2018). Los valores de las concentraciones más altas admisibles de un cierto número de impurezas y de las concentraciones máximas y mínima de agentes químicos que se añaden con el fin de minimizar la corrosión, la formación de lodos y los depósitos, deben estar de acuerdo con las tablas No 7 y 8.

Tabla 7

Agua de Alimentación Para Calderas e Vapor (Excepto El Agua de Pulverización del Desrecalentador) y Calderas de Agua Caliente.

Parámetro	Unidades	Agua De Alimentación Para Calderas de Vapor		Agua de Relleno Para Calderas de Agua Caliente
Presión de servicio	bar	>0.5 a 20	>20	Intervalo total
Apariencia	-	Clara, libre de sólidos en suspensión		
Conductividad directa a 25ºc	uS/Cm	no especificada, solo hay valores guía correspondientes al agua de caldera, véase la tabla 5.2		
Valor del ph a 25ºc	-	>9.2b	>9.2b	>7.0
Dureza total (Ca + Mg)	mmol/l	<0.01	<0.01	<0.05
Concentración de hierro (Fe)	mg/l	<0.3	<0.1	<0.2
Concentración de cobre (Cu)	mg/l	<0.05	<0.03	<0.1
Concentración de sílice (sio2)	mg/l	no especificada, solo hay valores guía correspondientes al agua de caldera, véase la tabla 5.2		-
Concentración de Oxigeno (O2)	mg/l	<0.05	<0.02	-
Concentración de aceite/grasa (véase la norma EN12953-6)	mg/l	<1	<1	<1

Parámetro	Unidades	Agua De Alimentación Para Calderas de Vapor	Agua de Relleno Para Calderas de Agua Caliente
Concentración de sustancias orgánicas (como C0T)	-	Véase nota* al pie de tabla	

a. Con aleaciones de cobre en el sistema, el valor del pH debe mantenerse en el intervalo 8.7 a 9.2.

b. Con agua ablandada del valor de pH>7.0 debería considerarse el valor del pH del agua de caldera de acuerdo con la tabla 5-2.

c. A presión de servicio <1 bar debe ser aceptable una dureza total máxima de 0.04 m mol/l.

d. En lugar de observar este valor, en funcionamiento intermitente o en funcionamiento sin des aireador, deben utilizarse agentes que forman película y /o un exceso de reductor de oxígeno.

e. las sustancias orgánicas son generalmente una mezcla de varios compuestos diferentes. La composición de tales mezclas y el comportamiento de sus componentes individuales en las condiciones de funcionamiento de la caldera son difíciles de predecir. Las sustancias orgánicas pueden descomponerse para formar acido carbónico y otros productos de descomposición acida que aumentaran la conductividad acida y causaran corrosión o depósitos. Esto puede llevar también a la formación de espuma y /o de arrastres de agua con el vapor que deben mantenerse tan bajos cómo es posible.

Fuente: (Sincal calderas industriales, 2018, p. 4)

Tabla 8

Agua de la Caldera Para Calderas de Vapor Y Calderas de Agua Caliente

Parámetro	Unidad	Agua De La Caldera Para Calderas De Vapor Que Utilizan			Agua De La Caldera Para Calderas De Agua Caliente
		Agua De Alimentación De Conductividad Directa >30 uS/Cm		Agua De Alimentación De Conductividad Directa ≤30 uS/Cm	
Presión de servicio	bar	>0.5 a 20	>20	>0.5	Intervalo total
Apariencia	-	Clara, libre sin espuma estable			

Conductividad directa a 25ºC	uS/Cm	<6000	véase la figura 5-1	<1500	<1500
Valor del pH a 25ºC	-	10.5 a 12.0	10.5 a 11.8	10.0 a 11.0	9.0 a 11.5
Alcalinidad compuesta	mmol/l	1 a 15	1 a 10	0.1 a 1.0	<5
Concentración de sílice (SiO2)	mg/l	depende de la presión, según figura 5-2			<5
Fosfato (PO4)	mg/l	10 a 30	10 a 30	6 a 15	-
Sustancias orgánicas	-	véase la nota ' al pie de tabla			-

a. Con recalentador se considera como valor máximo el 50% del valor más alta indicada.

b. El ajuste del pH básico se hace por inyección del Na_3PO_4, y una inyección adicional de NaOH solo si es el valor del pH<10.

c. Si la conductividad acida del agua de alimentación de la caldera es <0.2 uS/cm, y su concentración de Na +K es <0.010 mg/l, no es necesario la inyección de fosfato. Alternativamente puede aplicarse AVT (tratamiento totalmente volátil, agua de alimentación con pH ≥9.2 y agua de la caldera con pH ≥ 8.0) cuando la conductividad acida del agua de la caldera es < 5 uS/cm.

d. Si en el sistema hay presentes materiales no ferrosos, por ejemplo, aluminio, puede requerir un valor inferior del pH y de la conductividad directa; sin embargo, la protección de la caldera tiene prioridad.

e. Si se utilizan un tratamiento de fosfato coordinado; considerando todos los demás valores, son aceptables concentraciones de PO_4 más altas.

f. Véase en la tabla 5.1

Fuente: (Sincal calderas industriales, 2018, p. 5)

2.2.2.1.5. Problemas ocasionados por la mala calidad del agua. Ortiz y Talavera (2013), se describen los problemas de mayor importancia encontrados con frecuencia en las calderas, asociados a un tratamiento con baja eficiencia para el agua o la presencia de fierro, sílice, sales de sodio, magnesio y calcio, aceites, grasas y algunos hidrocarburos. Con la finalidad de dar a entender las consecuencias que pueden ocasionar al paso de un determinado tiempo.

- **Corrosión.** Para que esta aparezca es necesario que exista presencia de agua en forma líquida, el vapor seco en presencia de oxígeno, no es corrosivo, pero los condensados formados en un sistema de esta naturaleza son muy corrosivos.

  En las líneas de vapor y condensado se produce el ataque corrosivo más intenso en las zonas donde se acumula agua condensada. La corrosión que produce el oxígeno suele ser severa, debido a la entrada de aire al sistema, a bajo valor de pH, el bióxido de carbono abarca por si mismo los metales del sistema y acelera la velocidad de la corrosión del oxígeno disuelto cuando se encuentra presente el oxígeno.

  El oxígeno disuelto ataca las tuberías de acero al carbono formando montículos o tubérculos, bajo los cuales se encuentra una cavidad o celda de corrosión activa: esta suele tener una coloración negra, formada por un óxido ferrosoférrico hidratado.

  Una forma de corrosión que suele presentarse con cierta frecuencia en calderas, corresponde a una reacción de este tipo:

  $$3\ Fe + 4\ H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4\ H_2$$

  Esta reacción se debe a la acción del metal sobrecalentado con el vapor.

Otra forma frecuente de corrosión, suele ser por una reacción electroquímica, en la que una corriente circula debido a una diferencia de potencial existente en la superficie metálica.

Los metales se disuelven en el área de más bajo potencial, para dar iones y liberar electrones de acuerdo a la siguiente ecuación:

En el ánodo: $Fe^{-2e} \rightarrow Fe^{++}$

En el cátodo: $O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4\ HO$

Los iones HO^{-} (oxidrilos) formados en el cátodo migran hacia el ánodo donde completan la reacción con la formación de hidróxido ferroso que precipita de la siguiente forma:

$$Fe^{++} + 2OH^{-} \rightarrow Fe(OH)_2$$

Si la concentración de hidróxido ferroso es elevada, precipitará como flóculos blancos.

El hidróxido ferroso reacciona con el oxígeno adicional contenido en el agua, según las siguientes reacciones:

$$4Fe(HO)_2 + O_2 \rightarrow 4H_2O + 2Fe_2O_3$$

Las principales fuentes de corrosión en calderas son la corrosión por oxígeno o “pitting” y la corrosión cáustica. (pp. 30-31)

- **Incrustaciones.** La formación de incrustaciones en el interior de las calderas suele verse con mayor frecuencia que lo estimado conveniente.

El origen de las mismas está dado por las sales presentes en las aguas de aporte a los generadores de vapor, las incrustaciones formadas son inconvenientes debido a que poseen una conductividad térmica muy baja y se forman con mucha rapidez en los puntos de mayor transferencia de calor.

Por esto, las calderas incrustadas requieren un mayor gradiente térmico entre el agua y la pared metálica que las calderas con las paredes limpias.

Otro tema importante que debe ser considerado es la falla de los tubos ocasionados por sobrecalentamientos debido a la presencia de depósitos, lo que, dada su naturaleza, aíslan el metal del agua que los rodea pudiendo así sobrevenir desgarros o rupturas en los tubos de la unidad con los perjuicios que ello ocasiona.

Las sustancias formadoras de incrustaciones son principalmente el carbonato de calcio, hidróxido de magnesio, sulfato de calcio y sílice, esto se debe a la baja solubilidad que presentan estas sales y algunas de ellas, como es el caso del sulfato de calcio, decrece con el aumento de la temperatura. Estas incrustaciones forman depósitos duros muy adherentes, difíciles de remover, algunas de las causas más frecuentes de este fenómeno son las siguientes:

- Excesiva concentración de sales en el interior de la unidad.
- El vapor o condensado tienen algún tipo de contaminación.
- Transporte de productos de corrosión a zonas favorables para su precipitación.
- Aplicación inapropiada de productos químicos.

En general, las incrustaciones corresponden a depósitos de carbonatos y silicatos de calcio y magnesio, formados debido a una excesiva concentración de estos componentes en el agua de alimentación y/o regímenes de purga insuficientes.

En la figura 3 es posible observar la corrida superior de los tubos de humo de una caldera con incrustaciones de espesores superiores a los 8mm. (pp. 33-34)

Figura 3

Corrida Superior de los Tubos de Humo de unaCcaldera

Fuente: (Ortiz y Talavera, 2013, p. 34)

La acción de dispersantes, lavados químicos o las dilataciones y contracciones de una caldera pueden soltar las incrustaciones, por lo que deben ser eliminadas de una caldera muy incrustada para prevenir su acumulación en el fondo del cuerpo de presión, tal como se muestra en la figura 4.

Figura 4

Incrustaciones acumuladas en una caldera

Fuente: (Ortiz & Talavera, 2013, p. 34)

En el caso de que estas incrustaciones no sean removidas, se corre el riesgo de embancar la caldera y obstruir las líneas de purga de fondo, con lo que el problema puede tornarse aún más grave. La formación de incrustaciones en una caldera puede ser prevenida, satisfaciendo los requerimientos del agua de alimentación, con un tratamiento eficiente y manteniendo adecuados regímenes de purga.

- **Ensuciamiento Por Contaminación.** Se consideran en este rubro como contaminante, distintas grasas, aceites y algunos hidrocarburos, ya que este tipo de contaminación son las más frecuentes vistas en la industria. Dependiendo de la cantidad y característica de los contaminantes existentes en el agua de aporte a caldera, la misma generará en su interior depósitos, formación de espuma con su consecuente arrastre de agua concentrada de caldera a la línea de vapor y condensado, siendo la misma causante de la formación de incrustaciones y depósitos en la sección post-caldera.

  La formación de espuma suele ocurrir por dos mecanismos, uno de ellos es el aumento del tenor de sólidos disueltos en el interior de la unidad, los que sobrepasan los límites aceptados de trabajo, la presencia de algunos tipos de grasas y/o aceites (como ácidos orgánicos) producen una saponificación de las mismas dada la alcalinidad, temperatura y presión existentes en el interior de la caldera.

  La contaminación por hidrocarburos agrega a lo visto la formación de una película aislante dificultando la transferencia térmica entre los tubos y el agua del interior de la unidad, agravándose esto con las características adherentes de esta película que facilita y promueve la formación de incrustaciones y la formación de corrosión bajo depósito, proceso que generalmente sigue al de formación de depósitos sobre las partes metálicas de una caldera.

Luego de un tiempo, las características físicas de la película formado cambian debido a la acción de la temperatura que reciben a través de las paredes metálicas del sistema, lo que hace que el mismo sufra un endurecimiento y "coquificación", siendo este difícil de remover por procedimientos químicos simples. Por todas estas consideraciones, se ve como método más económico y lógico de mantenimiento de calderas, efectuar sobre el agua de aporte a las mismas los procedimientos preventivos que la misma requiera, evitando así costos de mantenimiento innecesarios y paradas imprevistas en plena etapa de producción con los costos de lucro cesantes que agravan la misma, en la figura 5 se muestra una vista interior de la cámara de vapor de una caldera, en cuyas paredes se nota la irregularidad del nivel de agua provocada por un excesivo contenido de sólidos en el agua. (p. 35).

Figura 5

Cámara de vapor de una caldera

Fuente: (Ortiz & Talavera, 2013, p. 36)

2.3. Tecnologías del Tratamiento de Agua en Calderas

Sánchez y García (2007), uno de los procesos más importante dentro del tratamiento externo del agua de calderas, es la eliminación de las sales del agua. Para realizar este proceso se emplean diversas tecnologías.

Las principales son las siguientes:

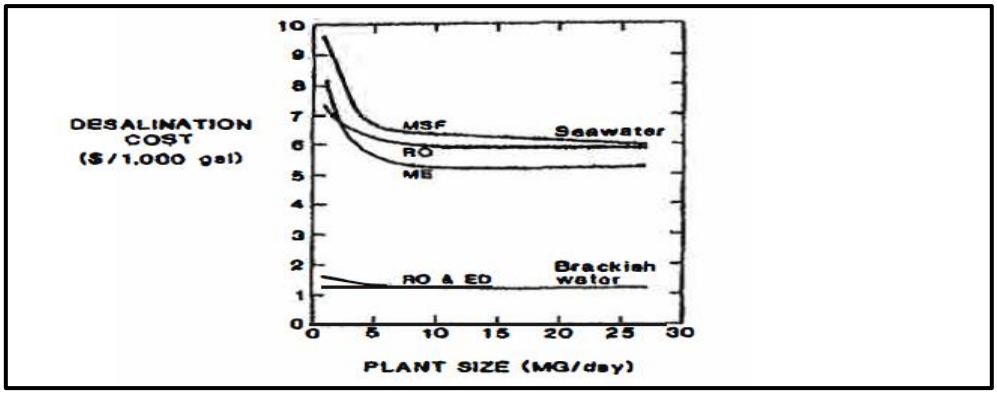
- Intercambio iónico.
- Ósmosis Inversa.
- Electro diálisis.
- Destilación (multiefectos, multietapas flash, etc.).

La selección de la tecnología más apropiada o de la combinación de estas tecnologías dependerá de muchos factores. Entre ellos se incluyen: la composición del agua dura, la disponibilidad de energía, la calidad de agua requerida entre otros. La Electrodesionización y la ósmosis inversa pueden combinarse de acuerdo a la composición del agua de alimentación.

El intercambio iónico y la electro diálisis son preferidos generalmente para soluciones con baja concentración, mientras que la destilación se utiliza para soluciones mucho más concentradas. A modo de referencia se muestra las figuras 6 y 7 en el cual se comparan los costos de estas tecnologías para desalinización del agua. (p. 12)

Figura 6

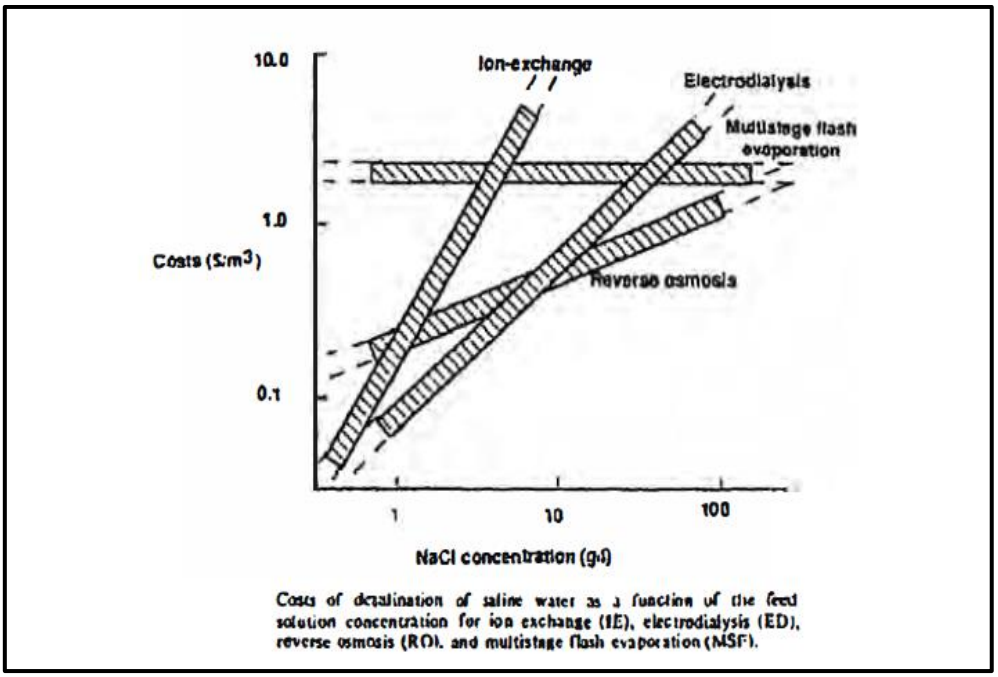
Comparación de Costos Estimados de Operación basados en el tamaño de la planta



Fuente: (Sánchez y García, 2007, p.13).

Figura 7

Costos de Desalinización del Agua Salina en función a la concentración de la Solución de alimentación



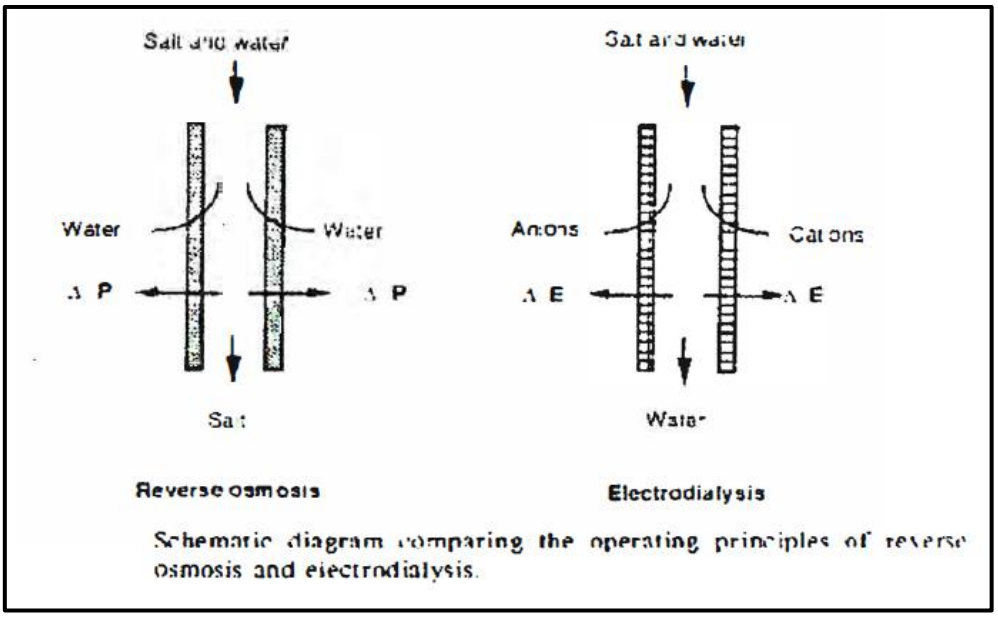
Fuente: (Sánchez y García, 2007, p.13).

Todos los procesos, en la práctica el consumo de energía es distinto. Para la eliminación de las sales se pueden utilizar los procesos de intercambio iónico, electro diálisis, ósmosis inversa y destilación.

Todos estos procesos requieren cierta cantidad de energía dependiendo la concentración de la solución de alimentación. Las diferencias en cuanto a la demanda de energía entre el electro diálisis y la ósmosis inversa pueden apreciarse en la figura 8.

Figura 8

Diagrama Esquemático de los principios de operación de la Ósmosis Inversa y la Electrodiálisis



Fuente: (Sánchez y García, 2007, p.14).

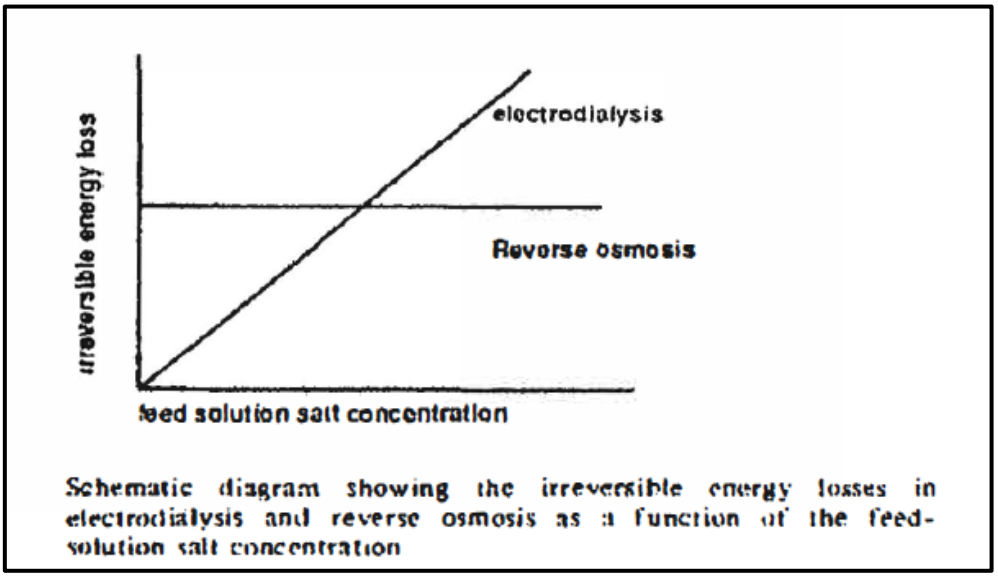
En un proceso de ósmosis inversa el agua pasa a través de la membrana bajo una fuerza motriz creada por una diferencia de presión hidrostática. Ignorando los efectos de la concentración por polarización, las pérdidas irreversibles de energía se originan por la fricción entre las moléculas del agua con los polímeros que conforman la matriz de la membrana. Estas pérdidas por fricción son independientes de la concentración de sal en el agua de alimentación.

En el caso del electro diálisis, los iones pasan a través de la membrana debido una fuerza motriz creada por un diferencial de potencial eléctrico. En este caso, sin embargo, las pérdidas de energía por fricción son directamente proporcionales a la concentración de sales en el agua de alimentación. Así, para un agua de alimentación con una baja concentración de sales, el requerimiento de energía es más bajo en electro diálisis que en ósmosis inversa mientras que, en otros casos con una alta concentración de sales, el consumo de energía en la

electro diálisis es mayor que en la ósmosis inversa. Esto puede apreciarse mejor en la figura 9. (p. 15)

Figura 9

Diagrama de perdidas irreversibles de energía en Ósmosis Inversa y Electrodiálisis



Fuente: (Sánchez y García, 2007, p.15).

En la figura 9 se evalúa las pérdidas irreversibles de energía versus la concentración de sales en el agua de entrada, asumiendo iguales concentraciones del agua de alimentación.

Una comparación de los consumos de energía de estos procesos de separación tiene que tomar en cuenta las diferentes formas en las cuales es requerida la electricidad. El electro diálisis emplea electricidad, la cual es relativamente cara, mientras que la destilación emplea calor. En el intercambio iónico, muy poca energía es requerida directamente, pero tiene que tenerse en cuenta el costo de los químicos empleados para la regeneración de las resinas.

2.3.1. Tecnologías de Intercambio Iónico

Sánchez y García (2007). El intercambio iónico es el término aplicado al proceso mediante el cual se intercambia los iones de una solución de agua salina mediante el empleo de intercambiadores naturales o del tipo sintético. Estos intercambiadores iónicos al contacto con la solución salina substituyen de manera reversible algunos de sus iones (en algunos casos

cationes y en otros aniones) por los de la solución salina. El intercambio iónico en el tratamiento del agua está basado en el principio de que las impurezas que se disuelven en el agua se disocian en forma de partículas cargadas positiva y negativamente, conocidas como iones. El material de intercambio iónico tiene la propiedad de intercambiar un ión por otro, tomándolo temporalmente en combinación química y dándole una solución regenerativa fuerte. La tabla 9 presenta los productos químicos regenerantes normalmente utilizados en el tratamiento del agua. (p. 16)

Tabla 9

Productos Químicos Regenerantes

Materiales de Intercambio Iónico	Productos Químicos Regenerados
Cambiadores catiónicos	
Ciclo del sodio	
Arena verde natural	NaCl
Gel sintético	NaCl
Carbón sulfonatado	NaCl
Resina de estireno	NaCl
Ciclo de hidrogeno	
Carbón sulfonatado	H_2SO_4
Resina de estireno	H_2SO_4 HCl
Cambiadores aniónicos	
Débilmente básico (amina alifática)	Na_2CO_3
Débilmente básico (fenólica)	Na_2CO_3
Débilmente básico (estireno)	NaOH
Fuertemente básico (tipo I)	NaOH
Fuertemente básico (tipo II)	NaOH

Fuente: (Sánchez y García, 2007, p. 18)

2.3.1.1. Características generales de las resinas. Las resinas catiónicas se subdividen en ciclo sodio (débil) y ciclo hidrógeno (fuerte), Las aniónicas a su vez, se dividen en débiles y fuertes. Las características principales de ambos tipos de resinas se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10

Tipos de Resina

Catiónicas Y Aniónicas Fuertes	Catiónicas Y Aniónicas Débiles
Operan a cualquier Ph	Operan dentro de un pH limitado
Tienen menor capacidad de intercambio que las débiles	Tienen mayor capacidad de intercambio que las resinas fuertes
deben de regenerarse con más frecuencia	Se regeneran casi estequiométricamente, es decir, un mínimo exceso de regenerante.
Su regeración es ineficiente, elevando el costo de operación	Tienen menor costo de operación.

Fuente: (Sánchez y García, 2007, p. 17)

2.3.1.2. Desmineralización por intercambio iónico. Sánchez y García (2007). Los des mineralizadores se emplean en plantas que utilizan calderas que operan a más de 1000 psi. Su función es la de eliminar materias disueltas en el agua pretratada de calderas por contacto con intercambiadores de resinas iónicas.

Estas resinas eliminan los sólidos disueltos por un intercambio iónico, dejando iones inocuos en el agua.

Las resinas pueden regenerarse para uso posterior por retro lavado, pero eventualmente deben reemplazarse por un lecho nuevo.

La desmineralización del agua requiere que el agua este completamente libre de sales minerales. Cuando se realiza por medio del intercambio iónico, este se realiza en dos etapas, siendo la primera el ciclo de hidrógeno (intercambio catiónico) seguido por el segundo paso,

el intercambio aniónico. A su vez los cambiadores aniónicos se dividen en cambiadores aniónicos básicos fuertes y débiles.

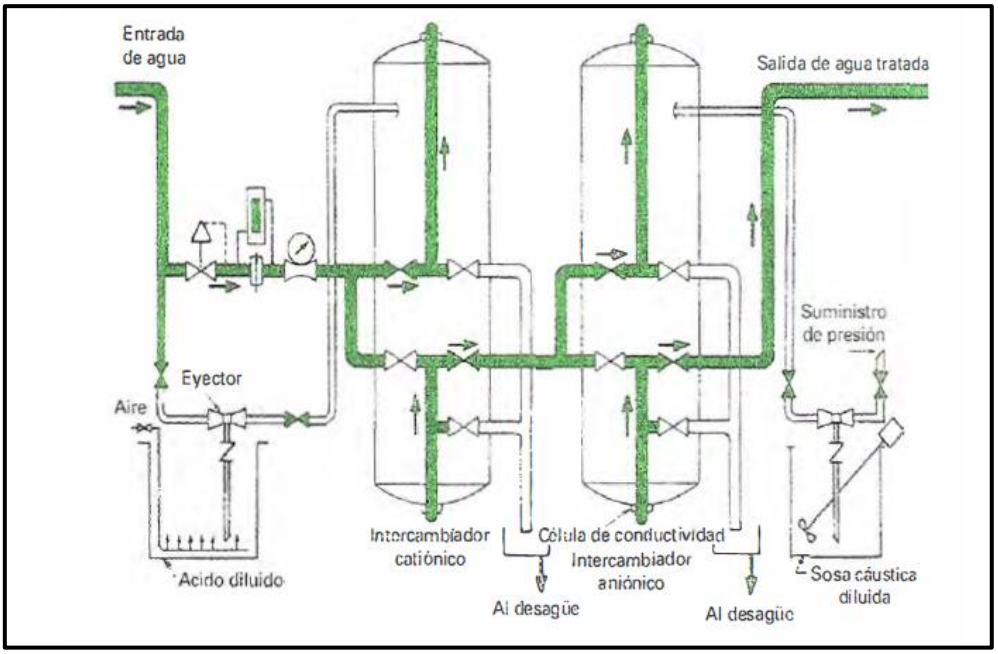
El intercambiador básico débil no eliminará ácidos débiles como el carbónico o el dióxido de silicio. Estas resinas son regeneradas por álcalis tales como el amoníaco, sosa cáustica o cenizas sódicas.

El cambiador básico fuerte puede eliminar ambos ácidos, fuertes y débiles, produciendo agua que esté libre de sílice y dióxido de carbono, pero es más costoso de operar. La regeneración se hace con sosa cáustica.

En los des mineralizadores de lecho mixto (figura 10), se mezclan los dos tipos de resinas juntas en un solo deposito. La regeneración en un lecho mixto puede llevarse a cabo porque las dos resinas pueden separarse hidráulicamente en lechos diferentes. (pp. 23-24)

Figura 10

Desmineralizador de Doble Lecho por Intercambio Iónico



Fuente: (Sánchez & García, 2007, p. 24)

2.3.1.2.1. Propiedades que rigen en el proceso de intercambio iónico.

- Las resinas son selectivas, con factores relativos de afinidad de 15 o más.
- La reacción de intercambio iónico es reversible.

En la reacción se mantiene la electro neutralidad:

$$[R]H + Na^{+} + HCl \leftrightarrow [R]Na + H^{+} + Cl^{-}$$

$$2[R]OH + 2H^{+} + SO_4^{-} \leftrightarrow [R]_2\, SO_4 + 2H_2O$$

Sufren ensuciamiento por la calidad de agua de alimentación y deterioro por una deficiente operación de retro lavado y enjuague.

La capacidad teórica de intercambio de una resina es la cantidad de grupos iónicos por unidad de peso o de volumen.

Las resinas se dilatan o se contraen según la forma iónica. La referencia al peso es mucho más constante, pero se suele usar la capacidad volumétrica de la forma completamente dilatada expresada en: meq/1, gramos/ ft3.

La capacidad aparente es un valor práctico que indica cuántos iones de la solución pueden ser captados realmente bajo las condiciones específicas de operación. (pp. 25-26)

2.3.1.2.2. ***Ventajas del proceso iónico***. Sánchez y García (2007). Se adapta a las necesidades de agua en donde las concentraciones de impurezas iónicas no superen 1000 ppm de STD. Las actuales resinas sintéticas tienen altas capacidades de intercambio, lo cual permite el diseño de equipos compactos con menor inversión. Las resinas son estables químicamente, de larga duración y de fácil regeneración.

Las instalaciones son automáticas o manuales para adaptarse a las condiciones específicas. (p. 26)

2.3.2. Tecnología de la Osmosis Inversa Aplicada a Sistemas de Generación de Vapor

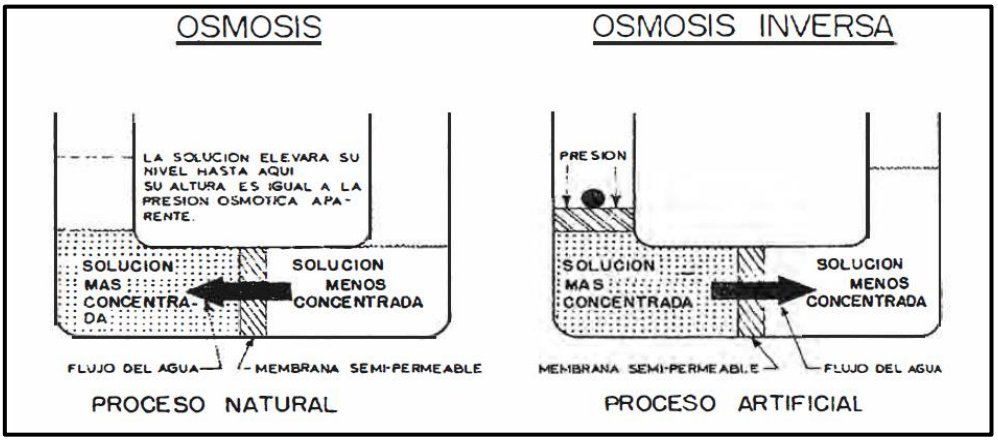
2.3.2.1. Osmosis inversa. Sánchez y García (2007). La ósmosis inversa hace referencia a la inversión de lo que se realiza en la ósmosis directa, por lo que persigue obtener agua pura desde un punto de agua salada o impura, se produce cuando se aplica una presión en la solución de mayor concentración promoviendo el paso de un líquido a través de la membrana.

La membrana actúa como una barrera frente a ciertas moléculas, y evita su transporte hacia la solución más diluida. La presión aplicada debe ser superior a la presión osmótica. La pureza y la cantidad de la solución resultante depende de la densidad de la membrana, de la naturaleza de los componentes de la solución y de la presión aplicada.

Pueden alcanzarse eficiencias del 90 - 95 %. El agua cruda que se trata, requiere un ajuste de pH y pretratamiento y/o incrustaciones de las membranas. La Ósmosis inversa y la Nanofiltración son las tecnologías de membranas de mayor uso en el tratamiento de agua su selección se basa en el costo y calidad del agua tratada. La Ósmosis inversa rechaza contaminantes o partículas del orden de 0 > 0001 μm y la Nanofiltración 0,001 μm. Los procesos de ósmosis y ósmosis inversa se muestran en la figura 11:

Figura 11

Procesos de Ósmosis y Ósmosis Inversa.



Fuente: (Sánchez y García, 2007, p. 28)

2.3.2.1.1. ***Operación de Membranas.*** Es una operación donde una corriente de alimentación se divide en dos, un permeado que contiene el material que ha pasado a través de la membrana y un concentrado conteniendo las especies que no lo atraviesa. (p. 29)

La causa más común de ensuciamiento es debido a las partículas suspendidas. Por eso, para una operación exitosa, los sólidos suspendidos deben ser removidos del agua de alimentación antes de que la corriente entre a la planta de ósmosis inversa.

Un segundo tipo de ensuciamiento es el encalichamiento de la membrana. Esto ocurre comúnmente cuando los límites de solubilidad de ya sea sílice, sulfato de bario, sulfato de calcio, carbonato de calcio, y fluoruro de calcio son excedidos. Exceder los límites de solubilidad originan que las sales insolubles precipiten en la superficie de la membrana. Para ello se requiere hacer un análisis químico de la corriente de alimentación a fin de establecer el correcto diseño de las plantas de ósmosis inversa y sus parámetros de operación. Es esencial que una planta opere al % de recuperación diseñado a fin de evitar la precipitación y consecuente encalichamiento en la superficie de la membrana.

Una tercera causa del ensuciamiento de la membrana son las bacterias. Las superficies de las membranas de ósmosis inversa son susceptibles particularmente a la colonización microbiana y a la formación de biopelículas. El desarrollo de una película de microbios en la superficie del agua de alimentación origina un decrecimiento en el flujo a través de la membrana y disminuye la eficiencia energética global del sistema. La adhesión de bacterias y la colonización en los canales del permeado tienen un potencial para deteriorar rápidamente la calidad del agua del permeado.

Los efectos acumulados de las biopelículas en las membranas son el incremento de los costos de limpieza y mantenimiento, deterioro del flujo y calidad del permeado.

Otros tipos de ensuciamiento que pueden ocurrir son la precipitación de óxidos metálicos, ensuciamiento por fierro, sulfuro coloidal, sílice y orgánicos.

Todos estos problemas de ensuciamiento en la membrana son controlados mediante un correcto diseño de la planta incluyendo un adecuado pretratamiento de la alimentación y apropiada operación y mantenimiento de la planta. Actualmente es bien aceptado que el encalichamiento y el ensuciamiento son los principales problemas que inhiben una mayor aceptación de la ósmosis inversa. (pp. 35-36)

2.3.2.1.2. Características de las Membranas de Ósmosis Inversa

- Los iones polivalentes son retenidos en mayor medida que los iones monovalentes.
- Los gases disueltos permean bien.
- El pH tiene un marcado efecto sobre la retención de ácidos inorgánicos débiles (ácido bórico) y ácidos orgánicos.
- En una serie homóloga, la retención aumenta con el peso molecular.
- La retención de isómeros aumenta con el incremento de la ramificación:
- terciaria > iso > secundaria > primaria.
- Los componentes con masa molecular > 100 dalton son retenidos sin relación con la carga.
- La Ósmosis inversa a baja presión se utiliza para producir agua potable de agua salobre de SD <= 12000 mg/1.
- La Ósmosis inversa de alta presión se emplea para producir agua potable de agua de mar.

2.3.3. Tecnología de la Electrodesionización- Electrodiálisis

Sánchez y García (2007). Aplicado a centrales de generación termoeléctrica en donde existen calderas que operan a presiones > 900 psi, se emplean equipos de Electrodesionización - electro diálisis combinados con los sistemas de ósmosis inversa. El equipo de electrodesionización se utiliza como la etapa de pulido final posterior al de ósmosis inversa.

Estos equipos funcionan con el siguiente principio:

Los minerales remanentes en el agua luego de pasar por el sistema de ósmosis y desgasificador existen como cationes positivamente cargados y aniones negativamente cargados. Por tanto, si se introducen placas cargadas positivamente y negativamente en la solución, los cationes tenderán a moverse hacia la placa negativa (cátodo) y los aniones hacia la placa positiva (ánodo).

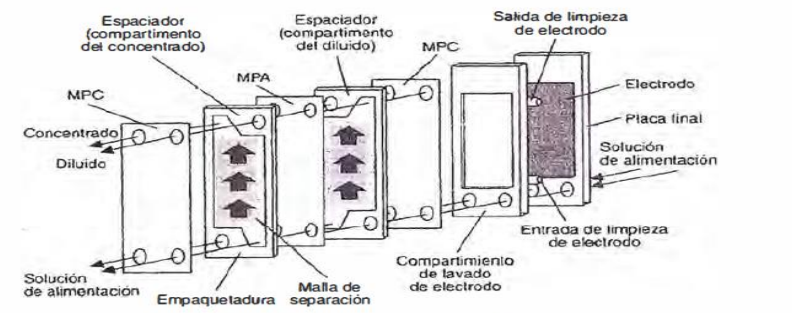
Luego un número de membranas de resinas de intercambio iónico son colocadas alternadamente entre las dos placas electrificadas. Un tipo de membrana solo permite pasar a los cationes y el otro solamente a los aniones, por ello se las denomina membranas permoselectivas. Estas membranas son geles polielectrolitos absorbentes del agua, que contienen grupos iónicos fijados a una matriz gel.

Se colocan compartimientos adecuados tal que permitan al agua conducirse hacia y desde cada uno de los pares de membranas de intercambio iónico. De este modo una corriente de agua pierde aniones y cationes mientras que la corriente adyacente los gana. Luego una corriente es desmineralizada mientras que la otra es desechada. Mediante recirculación o pasaje a través de un número de unidades sucesivas, las concentraciones de sales disueltas pueden llegar a valores extremadamente bajos.

La salinidad se concentra alrededor de los dos polos, dejando libre de sólidos disueltos la zona entre las membranas. La cantidad de energía eléctrica utilizada está en proporción a la cantidad de sólidos disueltos removidos de la corriente de agua tratada. Un ejemplo de un sistema de electrodesionización se aprecia en las figuras 12 y 13. (pp. 47-48)

Figura 12

Componentes de una batería de un sistema de Electrodesionización



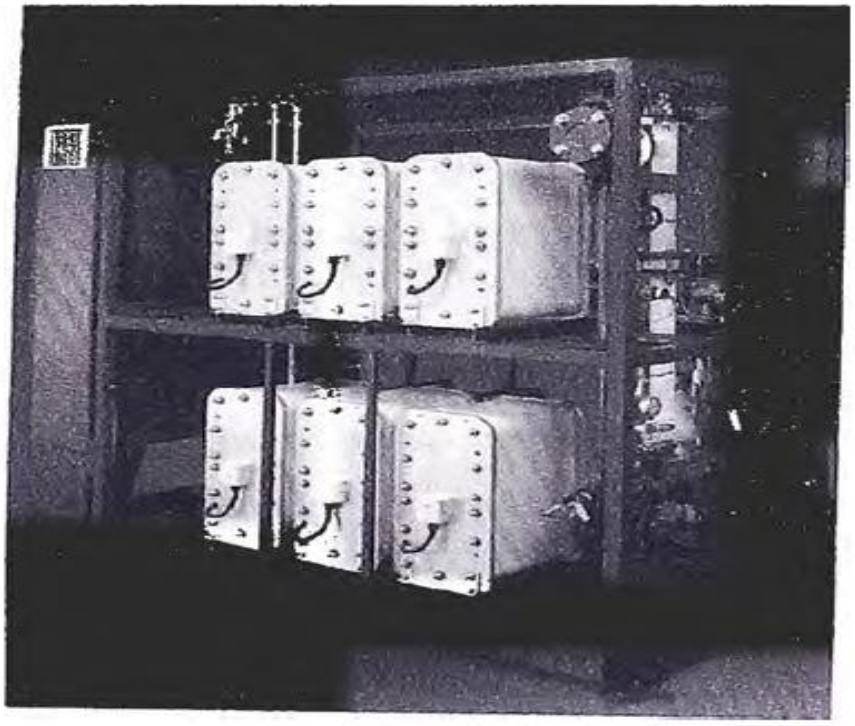
Componentes de una batería de ED. MPA = membrana permeable aniónica; MPC = membrana permeable catiónica.

[9] Daniels D., Power Plants learn to reuse, recycle, Power Magazine, Setiembre 2001, Pag. 45 – 54

Fuente: (Sánchez y García, 2007, p. 49)

Figura 13

Sistema de Electro deionización



2. **Electrodeionization** is becoming the standard at new power projects, and is being retrofit at scores of existing plants. The systems continuously regenerate resin, using dc voltage instead of acid and caustic chemicals

Fuente: (Sánchez y García, 2007, p. 49)

Los siguientes aspectos son limitativos del proceso electrodiálisis:

- Las membranas no son completamente selectivas, luego ninguna membrana deja pasar un solo tipo de ion. Ello origina una retro difusión de los iones.
- La resistencia eléctrica de las membranas, origina pérdidas de energía.
- Debido a ello se fabrican lo más delgadas posibles en relación a su resistencia física.
- Debido a la resistencia eléctrica de la solución acuosa las celdas se diseñan como membranas muy cercanas una de otras, siendo la distancia promedio del "corredor" formado de 1 mm de ancho.
- Se requiere turbulencia dentro de las celdas. Si ello no ocurre, se forma una capa de agua desalinizada que aumenta la resistencia eléctrica del conjunto.

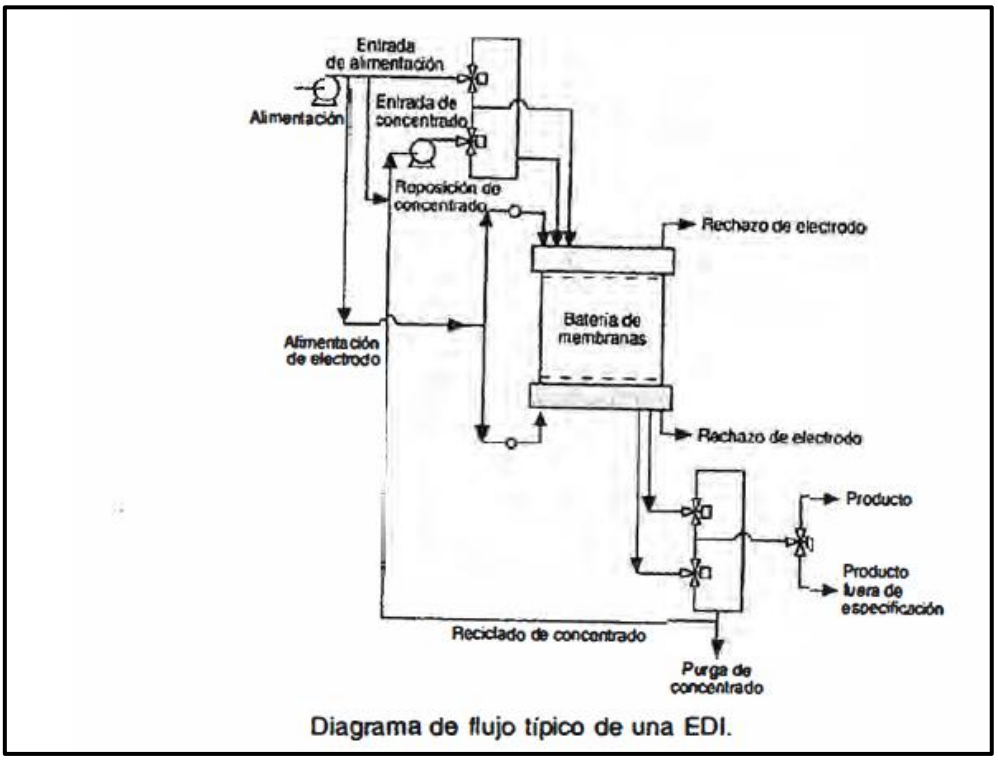
2.3.3.1. Electrodiálisis inversa. A fin de evitar los problemas originados por la electro diálisis se diseñaron los sistemas de electro diálisis inversa. Estos sistemas emplean EDI utilizan polaridad eléctrica inversa para controlar de manera continua la incrustación y el ensuciamiento de la membrana.

De este modo, la polaridad se invierte tres o cuatro veces cada hora. Esto invierte la dirección del movimiento iónico en el interior de la batería de membrana, controlando la formación de película e incrustación.

Al invertirse la polaridad, las corrientes que antes ocupaban compartimientos desmineralizantes se vuelven corrientes de concentrado y las corrientes que antes ocupaban corrientes de concentrado se vuelven corrientes desmineralizadas. Asimismo, las válvulas operadas automáticamente conectan las válvulas de modo que el agua de alimentación fluya hacía los nuevos compartimientos desmineralizantes y el reciclado hacia los nuevos compartimientos de concentración. (p. 50)

Figura 14

Diagrama de Flujo Típico de un Sistema de Electrodesionización.



Fuente: Fuente: (Sánchez y García, 2007, p. 51)

Las ventajas de la Electro diálisis Inversa:

- No requiere el uso de agentes químicos para su operación.
- Produce agua tratada a un pH casi neutro.
- Trabaja bien con un índice de incrustación alto.
- Funciona en un rango amplio de pH: 1 - l 0.
- Trabaja con turbidez similar al agua potable.
- Operan con agua cruda a temperaturas mayores de 40 º C.
- Funcionan a presiones menores de 5 bar.
- La vida útil de las membranas se extiende a más de 10 años.
- Debido al cambio de polaridad, la limpieza debido a la incrustación es continua y automática.

- Las membranas semipermeables pueden ser reusadas si la alta turbidez las atasca.
- Los únicos costos de operación provienen del consumo de energía eléctrica y cambio de cartuchos para filtros. (p. 51).

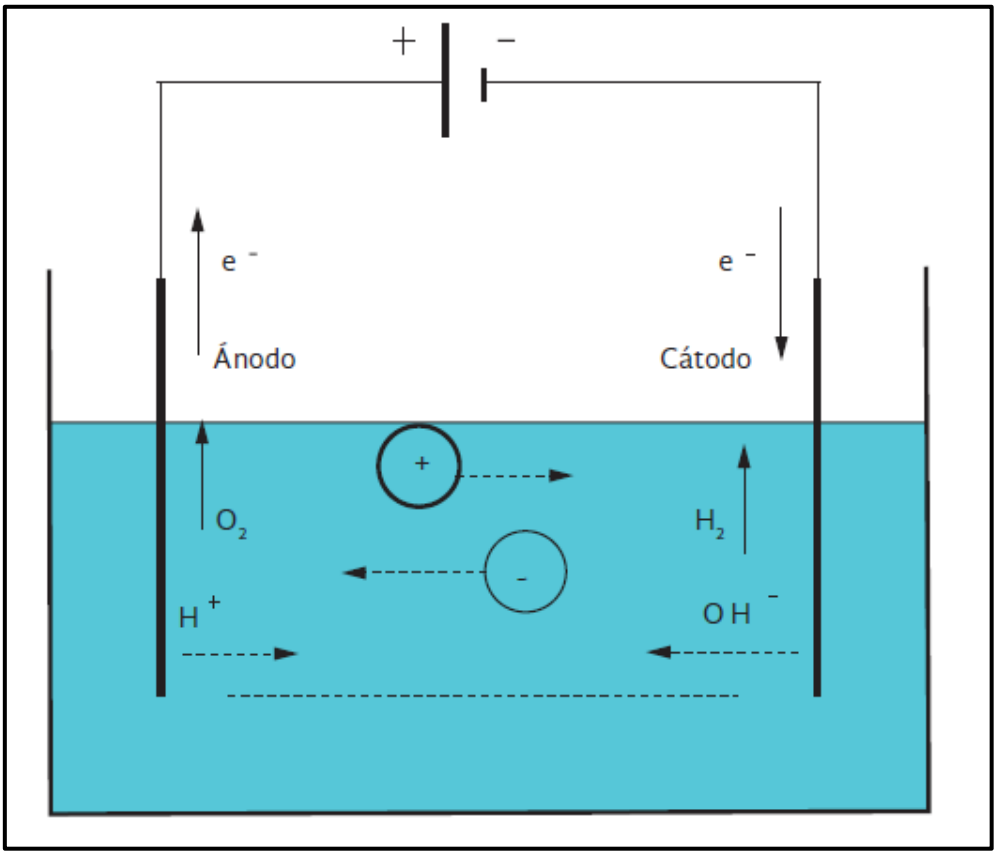
2.4. Proceso de Separación por Electrodiálisis

Comisión nacional del agua (2019), la electrodiálisis (ED) es un proceso de separación electroquímico en el cual sales minerales y otras especies iónicas se transportan a través de membranas de ion-selectiva de una solución a otra por la fuerza de un potencial eléctrico generado con corriente directa (CD). En la electrodiálisis las sales se remueven de la solución y el producto consiste en una solución diluida que contiene materia particulada y especies neutras que no se removieron en el proceso de electrodiálisis.

La sal recogida a través de la membrana forma el concentrado.

Figura 15

Principios de la Electrodiálisis



Fuente: (Comisión nacional del agua, 2019, p. 374)

Comisión nacional del agua (2019), aplicando una diferencia de potencial entre dos electrodos sumergidos en una solución que contiene iones positivos y negativos (baño electrolítico), se crea un campo eléctrico orientado en el cual los cationes se dirigen hacia el electrodo negativo (cátodo) y los aniones hacia el electrodo positivo (ánodo); en la figura 16 se puede observar el principio de la electrodiálisis.

En la interfase electrodo-electrolito ocurren las siguientes reacciones:

- Ánodo: Oxidación con pérdida de electrones.

  $\rightarrow A + e^-$

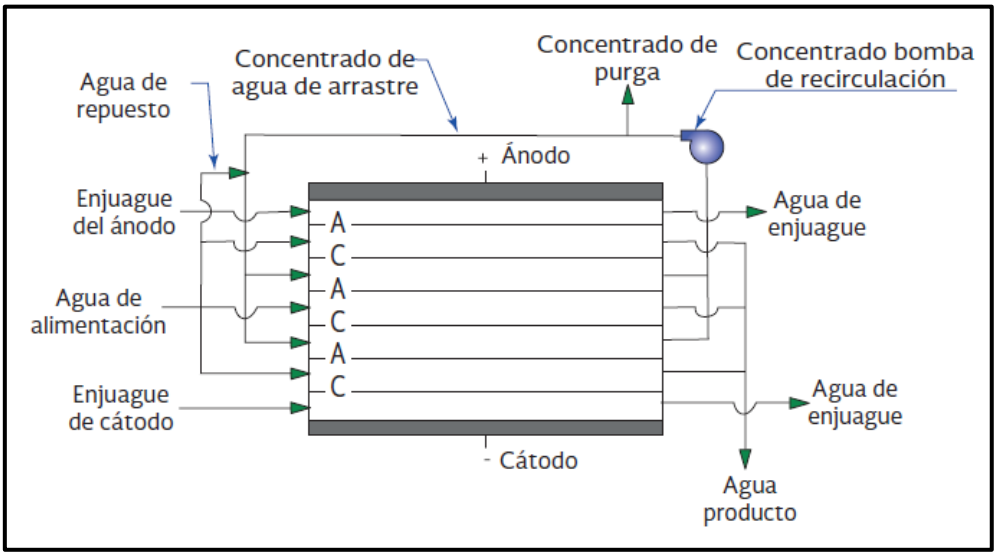
- Cátodo: Reducción ganando electrones.

  $C^+ + e^- \rightarrow C$

Para desmineralizar una solución utilizando la electrodiálisis, se hace un arreglo de membranas catiónicas y aniónicas alternadas entre plásticos espaciadores y se montan en un módulo el cual está configurado en un extremo con un electrodo positivo (ánodo) y en el otro, con un electrodo negativo (cátodo).

Figura 16

Electrodiálisis convencional. Módulo de membranas con ánodo y cátodo



Fuente: **(**Comisión nacional del agua, 2019, pp. 374-375)

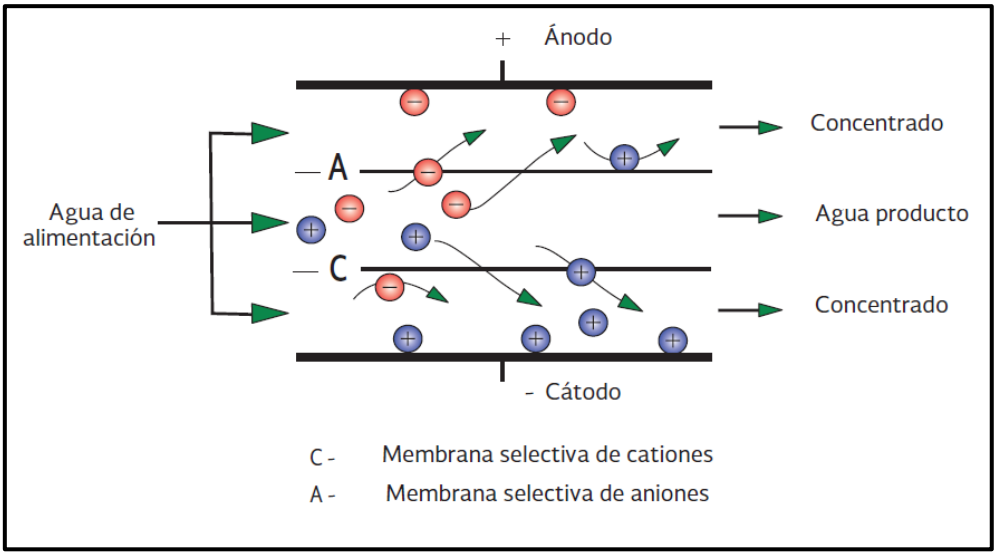
Al aplicar una corriente directa, se crea un potencial eléctrico que permite mover los iones, pero se encuentran con las membranas que forman barreras para los iones de carga opuesta.

De esta forma, los aniones que intentan migrar al ánodo pasaran a través de la membrana de aniones adyacentes, pero será detenido por la primera membrana catiónica que se encuentren. De igual forma los cationes que traten de llegar al cátodo, podrán pasar a través de la membrana catiónica, pero serán detenidos por la primera membrana aniónica que se encuentren. De esta forma las membranas forman compartimientos con iones diluidos (agua producto) y compartimientos concentrados (concentrado).

La Ilustración figura 17 esquematiza la migración de los iones en un sistema de electrodiálisis.

Figura 17

Migración de los iones dentro de las membranas del módulo



Fuente: **(**Comisión nacional del agua, 2019, p. 376)

2.4.1. Electrodiálisis de Polaridad Reversible (EDR)

Comisión nacional del agua (2019), desde principio de los años 70, se empezó el uso de la electrodiálisis reversible. Una unidad de electrodiálisis reversible opera con los mismos principios de la electrodiálisis convencional, excepto en que los canales de producto y

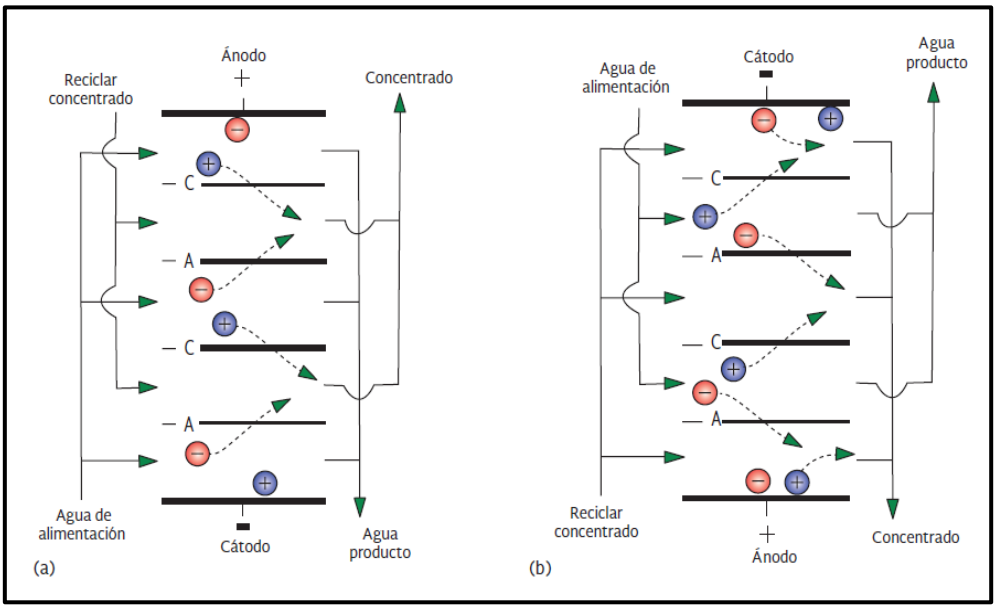
concentrado son idénticos en construcción (Figura 18). Esto permite invertir la polaridad de los electrodos, lo que induce una autolimpieza química y la desmineralización del agua con recuperaciones muy elevadas del orden del 90%, con mínimo pretratamiento y bajos costos de operación (0.15 – 0.20 euros por metro cubico).

Esta forma de operación evita la formación de incrustaciones, ya que hay una inversión periódica de la polaridad de los electrodos. Durante el periodo de la inversión, se intercambian los compartimientos de concentrado y de agua producto. Actualmente la técnica de cambio de polaridad se utiliza en todas las instalaciones de electrodiálisis.

Esto ha permitido disminuir los requerimientos de pretratamiento del agua, pero a costo de ciertas complicaciones en el equipo. Fue necesario implementar válvulas automáticas para intercambiar los efluentes de agua desmineralizada y la de concentrado al invertir la polaridad. Además, en este caso, ambos electrodos deben ser resistentes a la corrosión anódica debido a que tienen funciones intercambiables.

Figura 18

Esquema del proceso de electrodiálisis reversible

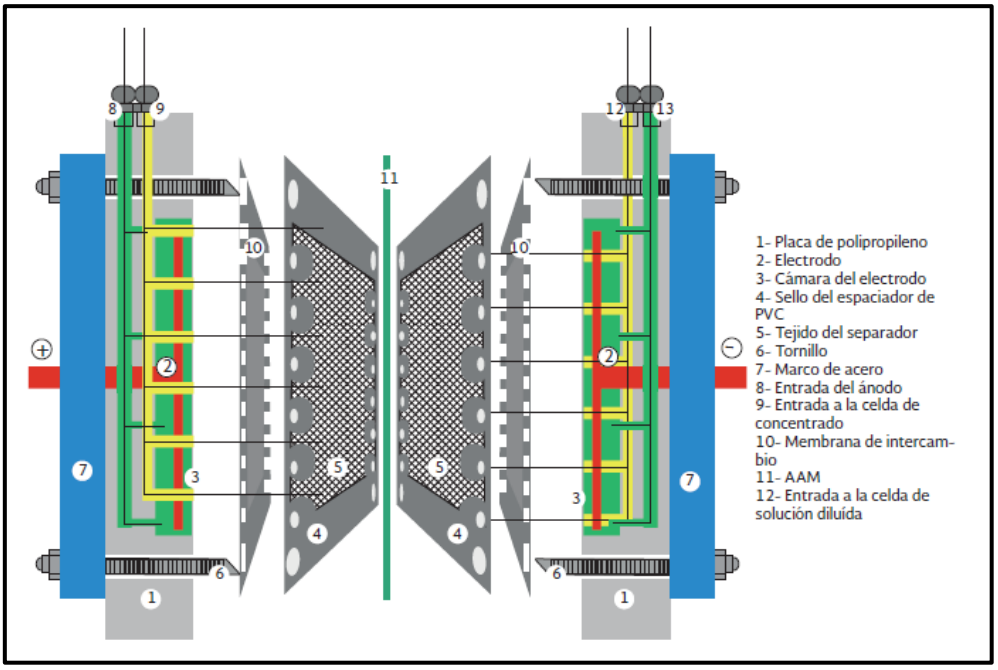


Fuente: **(**Comisión nacional del agua, 2019, p. 376)

2.4.1.1. Equipo de electrodiálisis. En los equipos de electrodiálisis se colocan separadores o espaciadores entre las membranas. Estos están formados de dos capas de polietileno de baja densidad. En la figura 19 se presenta tal como los espaciadores tienen perforaciones tipo malla formando sendas de circulación. Cada espaciador y todas las membranas tienen cuatro agujeros que forman cuatro conductos dentro de cada etapa. Los conductos están alineados con los bloques terminales, a los cuales están conectadas las corrientes principales. El agua de uno de los conductos fluye en el espaciador entre dos membranas por las sendas y es recolectada en otro. Los espaciadores son de dos tipos, las sendas del primero corresponden a dos de los conductos y del otro a los otros dos. Un par de separadores y membranas está formado de la siguiente forma: membrana catiónica – separador tipo uno – membrana aniónica –separador tipo dos.

Figura 19

Partes que componen un módulo de membrana



Fuente: **(**Comisión nacional del agua, 2019, p. 377)

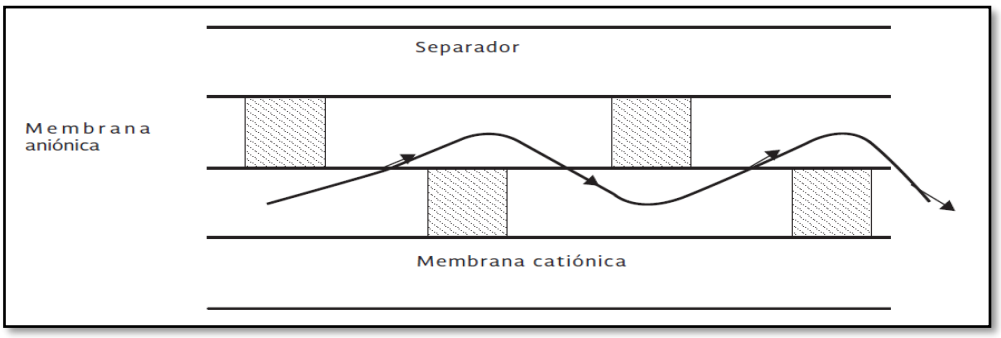
Los espaciadores determinan la forma de conducir el agua entre las membranas. Una mayor turbulencia favorece un mayor flujo de electricidad por unidad de área y un uso más

eficiente del área de las membranas ya que ayuda a la transferencia de iones a la superficie. La turbulencia también evita la formación de capas de alta concentración y depósitos sobre la superficie de las membranas.

En la figura 20 se muestra una sección transversal de un espaciador ubicado entre dos membranas y la trayectoria de la corriente del agua en las sendas del espaciador.

Figura 20

Flujo de agua en los separadores



Fuente: **(**Comisión nacional del agua, 2019, p. 378)

Existen diferentes modelos de espaciadores. Cada modelo se caracteriza por sus dimensiones número de pasos paralelos del agua, la longitud del paso del agua y el área efectiva de transferencia. El grosor de los espaciadores es de 1 milímetro. La longitud del paso del agua determina la velocidad del agua para una determinada caída de presión en la unidad. La velocidad del agua, por su lado, determina el grado de turbulencia de la mezcla, el tiempo en el cual una cantidad de agua está sometida a la acción del campo eléctrico, y por lo tanto la cantidad de sales transferidas por el paso a través de un par de separadores y membranas. La velocidad del agua y la caída de presión son parámetros de diseño que permiten seleccionar adecuadamente el modelo de los separadores y determinan la flexibilidad del sistema de electrodiálisis (Meller, 1984).

Los electrodos utilizados en los equipos de electrodiálisis son generalmente de titanio platinado. Su forma y apariencia varia en las diferentes unidades dependiendo de su posición.

El área alrededor de los conductos es recubierta para prevenir cortos circuitos entre los electrodos a través de los colectores e inhibir la formación de hidrógeno en las extremidades de los colectores. El recubrimiento alrededor de los colectores de las corrientes principales y de los compartimentos de electrodos este hecho de compuestos no conductores del tipo coke. La vida de un electrodo depende generalmente de la composición iónica de las corrientes en los compartimientos de los electrodos y del amperaje por unidad del área del electrodo. Altos amperajes y aguas con alta concentración de cloruros o de compuestos con tendencias de formar incrustaciones, tienden generalmente a disminuir la vida de los electrodos.

El conjunto de dos electrodos con varios pares de espaciadores y membranas forma un módulo de electrodiálisis (Figura 21). La configuración del módulo (selección y ordenamiento de las membranas) puede variar dependiendo de los objetivos del tratamiento. Los módulos pueden ser orientados verticalmente o horizontalmente y tener diferentes cantidades de pares de espaciadores y membranas. La cantidad de pares determina la presión hidráulica requerida para transferir una determinada cantidad de agua a través del módulo. En cuanto mayor sea la cantidad de pares mayor es la caída de presión en el módulo y se requiere mayor presión hidráulica en la entrada. El límite máximo de la presión se define por la presión que soportan las membranas, generalmente hasta 50 psi o 3.4 atm. Cada tipo de separadores presenta un determinado perfil de presión – velocidad. Así, conociendo el caudal se calcula la velocidad, con la cual se pueden determinar las pérdidas de presión en un módulo.

Figura 21

Módulo de Electrodiálisis

Fuente: (Comisión nacional del agua, 2019, p. 379)

Los compartimientos de los electrodos están localizados en los extremos del módulo de electrodiálisis. Un compartimento de electrodos está formado por un electrodo, un espaciador y una membrana catiónica gruesa. El grosor de este espaciador es de 3 mm. Además, este tiene un diseño especial de las sendas, de tal forma que se evita el paso del agua del compartimiento de electrodos a las corrientes principales del módulo formando una corriente individual del compartimento de electrodos.

La unidad de electrodiálisis (módulo) puede constar de dos o más etapas eléctricas conectadas en serie de tal modo que la corriente del agua pasa primero a través de la primera etapa, luego por la segunda y así sucesivamente. Esto permite obtener mayor capacidad de remoción de sales y hace al sistema más flexible, evitando polarizaciones y limitaciones de presión por aumentar la cantidad de pares en un mismo modulo. Los electrodos de cada etapa forman una corriente eléctrica independiente. Es muy común el arreglo de dos etapas en el cual el ánodo es común para los dos módulos.

El diferencial de presiones en el módulo es la diferencia de las presiones hidráulicas entre el flujo de agua desmineralizado y la corriente del concentrado. Durante una operación normal del módulo de electrodiálisis, la presión de la corriente desmineralizada se mantiene en 0.5 a 1 psi mayor que la del concentrado.

Esto con el objetivo de asegurar que, si dentro del módulo ocurre algún escape de agua entre los canales del agua desmineralizada y el concentrado, el agua desmineralizada pasara al concentrado, y no al revés, lo cual contaminara el producto.

En el proceso de electrodiálisis, junto con los iones, una pequeña cantidad de agua es transferida a través de las membranas a pesar de su impermeabilidad.

La cantidad de agua transferida representa las pérdidas de agua desmineralizada del sistema. La pérdida varía dependiendo del tipo de las membranas y de la concentración de las soluciones. Generalmente las pérdidas del sistema de electrodiálisis son de 0.5 por ciento del flujo del agua desmineralizada por 1000 ppm de sales removidas.

Los módulos de electrodiálisis tienen también un límite de temperatura de operación. Este límite se determina por el material del cual están fabricados los espaciadores, el cual tiende a perder su rigidez a mayores temperaturas. Las membranas pueden resistir temperaturas mayores, generalmente hasta 60-70 grados Celsius. (p. 380)

2.4.1.2. Consideraciones y parámetros de diseño. Comisión nacional del agua (2019), para el diseño de un sistema de electrodiálisis se deben cumplir dos aspectos principales de diseño: El pretratamiento y la selección del módulo de electrodiálisis y el arreglo general de la planta.

Una planta puede estar constituida por diferentes módulos que pueden disponerse en serie o paralelo dependiendo del flujo y calidad del agua requerida y puede ser modulada considerando las necesidades de crecimiento en el futuro. Las instalaciones comunes en los módulos incluyen cabezales de tubería, tuberías, medidores, bombas para presurizar el sistema,

tanques para la limpieza química, sistemas de pretratamiento, químicos para ajuste de pH, tanques para el almacenamiento del agua tratada, sensores, sistemas de automatización entre otros.

2.4.1.3. Pretratamiento. Comisión nacional del agua (2019), la mayoría de los sistemas requieren pretratamiento para eliminar sustancias incrustantes que puede traer el agua alimentada. Estos incrustantes pueden ser partículas, sustancias orgánicas, bacterias y sustancias minerales como la silica. También se deben eliminar otras sustancias químicas, como por ejemplo el cloro, que pueda dañar las membranas.

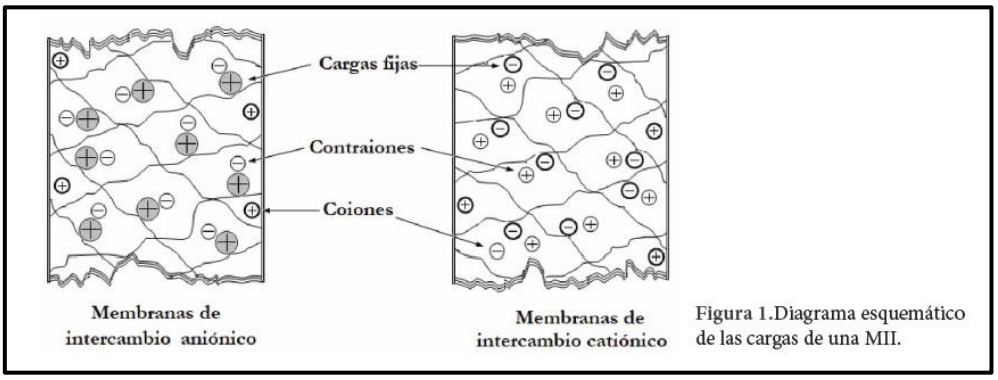
Para la eliminación de partículas se pueden utilizar filtros de cartucho que permiten reducir los niveles de partículas a concentraciones toleradas por las membranas. Si el agua contiene altas concentraciones de partículas también se puede integrar un sistema de microfiltración antes de la electrodiálisis. (pp. 380-381)

2.4.1.4. Membrana de electrodiálisis. Casells (2014), la membrana de electrodiálisis es una pared delgada, densa e insoluble, constituida por un material polímero permeable a los iones que, colocada entre dos soluciones, permite una transferencia selectiva de iones de una solución hacia la otra, bajo la acción de un campo eléctrico. (p. 28)

2.4.1.4.1. Desalación por membranas. Torres et al. (2019), las propiedades selectivas de las membranas de intercambio iónico (MII) están asociadas a los tres tipos de especies cargadas que pueden encontrarse en su seno (Figura 22): (a) cargas fijas, que se encuentran inmovilizadas en la membrana; (b) contraiones, especies cargadas móviles que contrarrestan la carga de las fijas; y (c) coiones, éstos son especies móviles cuya carga es del mismo signo que la de las fijas.

Figura 22

Diagrama esquemático de las cargas de una MII.

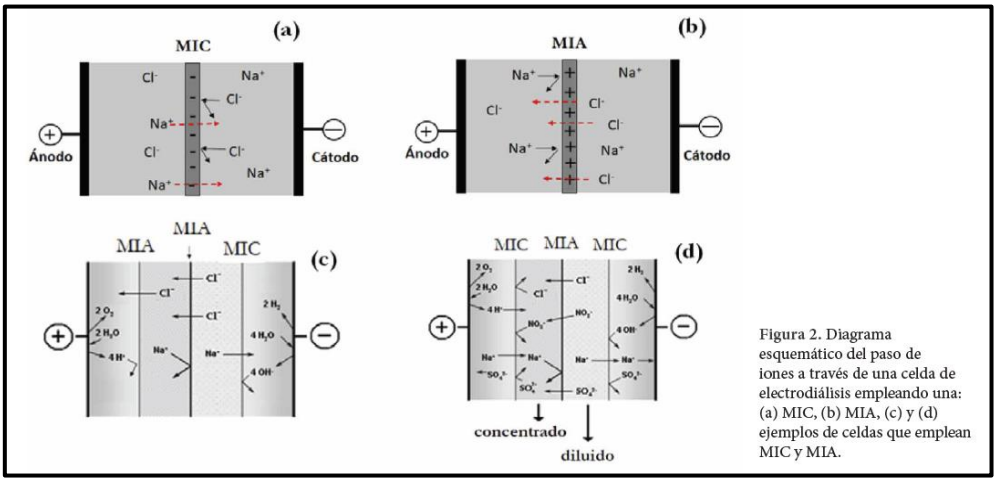


Fuente: (Torres et al., 2019, p. 7),

Durante la electrodiálisis, por medio de dos electrodos se genera un campo eléctrico el cual actúa como una fuerza impulsora que mueve a los iones en la disolución y a través de la MII. Los aniones se moverán hacia el ánodo y los cationes al cátodo. El movimiento de los iones a través del dispositivo estará condicionado por las MII, debido a que se desarrollan interacciones entre los iones presentes en la solución y sus cargas fijas (Figura N°23). Cuando éstas son negativas, se denominan membrana de intercambio catiónico (MIC), ya que solamente pueden ser atravesadas por cationes, porque repelen electrostáticamente a los aniones (Figura 23, a). Mientras que si la membrana, denominada en este caso de intercambio aniónico (MIA), tiene cargas fijas positivas, entonces son atravesadas por aniones y rechazan a los cationes (Figura 23, b). De esta forma, se produce una separación selectiva de las especies de acuerdo a su carga. Un arreglo con más de un tipo de MII (Figura 23, c, d) permite obtener una solución concentrada y otra diluida en un ion particular. Adicionalmente, en este último acomodo se impide que los compuestos formados en los electrodos lleguen a los compartimentos centrales. (p. 7)

Figura 23

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



Fuente: (Torres et al, 2019, p.8).

Un concepto esencial asociado a una MII es sin duda su selectividad, la cual se puede definir como la capacidad que posee una MII de discriminar a ciertas especies. Ésta se puede cuantificar a través del número de transporte de un ion en la MII (tm), que es la fracción de corriente, del total que atraviesa a una solución, asociada a cada ion. Si se utiliza al contraión para cuantificar esta cantidad, debido a que es el único que atraviesa la MII, se puede definir la selectividad ideal de la membrana con un tm cercano a la unidad. Si otros iones atraviesan la MII, contribuyen al transporte de carga y por consecuencia a la disminución de tm.

Por otra parte, las curvas I-V, son representaciones gráficas entre la corriente que atraviesa a la membrana en función de la diferencia de potencial que se desarrolla entre sus dos caras.

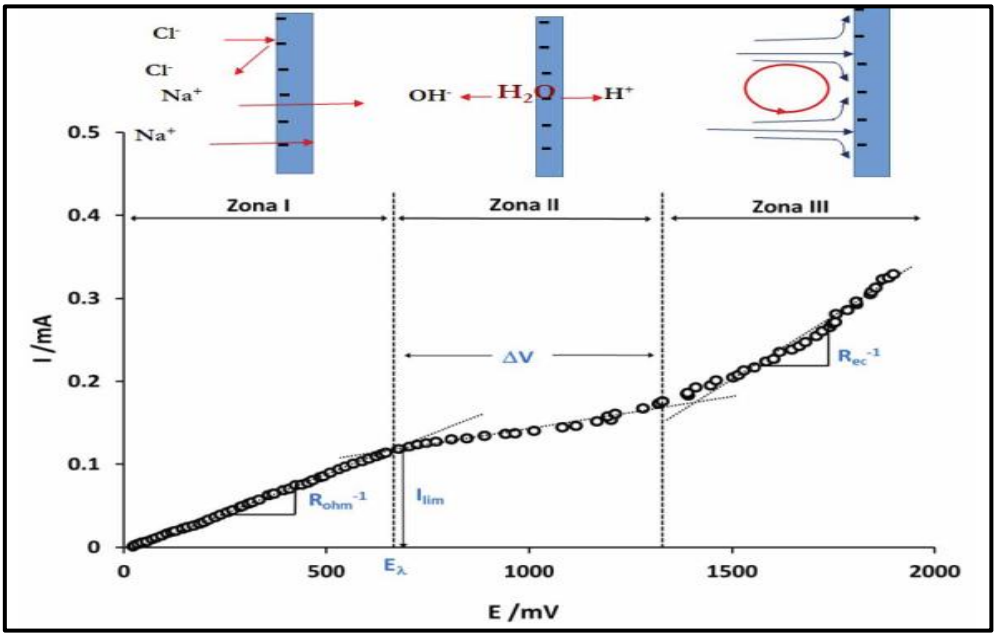
Una curva de polarización tiene una forma típica (Figura 24), en la que se distinguen tres secciones o zonas a las cuales se asocian a fenómenos específicos.

La zona I o zona óhmica, se caracteriza por una relación lineal entre la corriente y el potencial, es decir se cumple la ley de Ohm. Esto se debe a que el incremento de la fuerza

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

Figura 24

Representación de Curva de polarización



Fuente: (Torres et al, 2019, p.8).

2.4.1.4.2. Membranas de intercambio iónico y sus propiedades.

Miño (2005). La electrodiálisis se fundamenta en dos tipos básicos de membranas: membrana de intercambio catiónico y membrana de intercambio aniónico. Las membranas de intercambio catiónico están formadas por cadenas de polímero que contienen grupos fijos en su estructura con carga negativa, mientras los iones positivos se encuentran dispersos y libres en los huecos de las cadenas. De forma semejante las membranas de intercambio aniónico contienen grupos fijos en su estructura con carga positiva y los iones negativos es encuentran libres en los huecos de la misma. Naturalmente en cada momento se cumple la electroneutralidad de la membrana como un todo. Dado que las cargas negativas se encuentran fijas en una membrana de intercambio catiónico, los aniones son rechazados por las cargas negativas y no pueden pasar a través de la membrana del intercambio catiónico, es decir que las membranas de intercambio catiónico son solamente permeables a los cationes.

Las membranas del intercambio aniónico, actúan de manera inversa a las membranas de intercambio catiónico. La diferencia fundamental entre una membrana y las resinas de intercambio iónico, es que las membranas permean el paso de iones a través ésta y las resinas los adsorben.Las propiedades de las membranas tanto físicas como electroquímicas son fundamentales en el proceso de electrodiálisis, una adecuada selección de membranas garantiza el éxito de la separación de iones del agua, además es importante entender las características de las membranas para conocer las condiciones a las que puede ser sometida, ya que están estarán, no solo en contacto con agua residual con contenidos de metales pesados, sino con corrientes eléctricas que generan en la celda una diferencia de potencial.

Sybron Chemicals, Eurodia Industrie S.A (Ameridia), Electropure Excellion, son algunos de los proveedores de membranas de intercambio iónico en el mercado mundial. Sybron Chemicals INC, fabrica las membranas de intercambio catiónico conocidas como MC-3470 y membranas de intercambio aniónico conocidas como MA-3475, Eurodia Industrie

fabricas las membranas conocidas como NEOSEPTA que, de acuerdo con las especificaciones, la membrana catiónica CM-1 y la Membrana Aniónica AM-1, tienen aplicabilidad en el tratamiento de efluentes de la industria galvánica y la Casa Electropure Excellion fabrica membranas catiónicas I-100 y membranas aniónicas I-200. Las especificaciones típicas (propiedades) de las membranas cambian dependiendo del proveedor, en la Tabla 11. Especificaciones típicas de las membranas de intercambio iónico, se aprecian las propiedades de cada una de las membranas fabricadas por los proveedores anteriormente mencionados. (pp. 19-20)

Tabla 11

Especificaciones Típicas De Las Membranas De Intercambio Iónico

Especificaciones		Sybron Chemicals INC		Electropure Excellion		Amerida	
Ítem	Unidad	MC-3470	MA-3475	I-100	I-200	Neosepta CM-1	Neosepta AM-1
Tipo	---	Catiónica	Aniónica	Catiónica	Aniónica	Catiónica	Aniónica
Forma Química	---	Na-form	Cl-form	Na-form	Cl-form	Na-form	Cl-form
Resistencia eléctrica	Omh/cms 0.1N NaCl	25	50	---	---	---	---
	Omh/cms 1.0N NaCl	10	25	---	---	---	---
	Omh -cm2, DC 0.5 N NaCl	---	---	7.5 - 12.5	5.0 - 10	0.8 - 2.0	1.2 - 2.0
Permeabilidad al Agua	ml/hr/ft2/5 psi	25	25	<1	<1	---	---
Mullen Burst Test, min	psi (lb/in2)	150	150	15	15	---	---
	Bar	103	---	---	---	---	---
	Kg/cm2	---	---	---	---	2.5 - 3.0	3.0 - 3.5
Capacidad de intercambio	Meq/gm	1.4	0.9	Medida si se requiere	Medida si se requiere	2.0 - 2.5	1.8 - 2.2
Estabilidad a la T° max.	°C	80	80	100	100		

Fuente: (Miño, 2005, p. 20)

La resistencia es uno de los parámetros que determinan los requerimientos energéticos en un proceso de electrodiálisis. La resistencia de la membrana es menor que la resistencia de las soluciones que la rodean, ya que la concentración iónica de la membrana es muy elevada, a menor resistencia de la membrana, menor consumo de energía.

La resistencia de la superficie de las membranas de intercambio iónico se determina por medidas de conductividad en una celda que consta de dos cámaras bien agitadas y separadas por la membrana. La celda se llena con una solución de NaCl y se mide la resistencia de ésta con y sin membrana. La resistencia de la membrana será la diferencia de la conductividad entre las dos medidas.

La Permeabilidad al Agua, indica la cantidad de agua que la membrana deja pasar, las membranas de Sybron son más permeables al agua que las membranas de Electropure, ya que estas últimas tienen una permeabilidad inferior a uno.

El Ensayo de Mullen (Mullen Burst Test), mide la presión requerida para estallar un material, para el caso de las membranas de Sybron Chemicals, tanto la aniónica como la catiónica, el test de Mullen está a 150 psi (10.3 bar), mientras que las de Electropure se encuentran entre 44 y 47 psi. Entre los tres tipos de membranas las que requieren menor presión para ser estalladas son las del proveedor Electropure Excellion.

La Capacidad de Intercambio Iónico (meq/gm), se define como el potencial de cada membrana para remover iones específicos bajo las condiciones establecidas, es constante y es una de las propiedades más importantes de las membranas.

2.4.1.4.3. Pretratamiento de las membranas. Miño (2005). Es importante que antes de empezar el tratamiento de aguas residuales por empleando membranas de intercambio iónico, se haga un pretratamiento o acondicionamiento de acuerdo con la naturaleza de la solución de interés o de acuerdo con las especificaciones de los proveedores.

Sybron Chemicals aconseja para alargar la vida útil de la membrana, aplicar dos métodos antes de empezar a usar la membrana, los métodos son los siguientes:

1. Método A: Las membranas deben ser sumergidas completamente en una solución similar a la que será sometida la membrana en el proceso de tratamiento, es preferible que la temperatura de esta solución no exceda los 55oC y se mantenga inmersa por un tiempo mínimo de tres horas para asegurar la hinchazón completa de la membrana.
2. Método B: Como una alternativa, las membranas pueden ser empapadas en agua o en una solución de sal (NaCl), bajo las mismas condiciones de temperatura y tiempo tal como se dijo anteriormente.

De igual forma Electropure Excellion, recomienda sumergir las membranas en agua desionizada entre 82 y 90oC, en un tiempo de 24 a 48 horas. Las membranas se hincharán entre un 15 y un 25% en todas sus dimensiones cuando han sido pretratadas.

Para las membranas Neosepta, estas deben ser inmersas en la solución del proceso cerca de una hora antes de que está sea instalada para evitar de arrugar o la tensión excesiva en la membrana instalada. (p. 22).

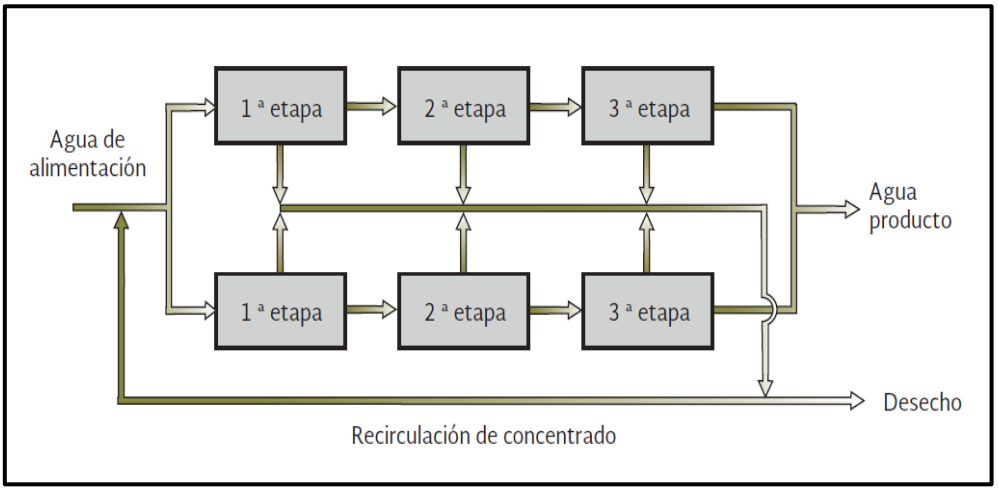
2.4.1.5. Condiciones de operación. (Comisión nacional del agua,2019). Los equipos de electrodiálisis pueden operar en forma continua o Bach. Los módulos se colocan en paralelo para conseguir la capacidad hidráulica requerida (Cantidad de flujo a tratar), o en serie para obtener el grado de desmineralización deseado (Figura 25). Una instalación para desmineralización puede consistir de tres unidades en serie**.**

Una porción de la corriente de concentrado se recircula para mantener la misma presión y flujo en ambos lados de la membrana. Generalmente a la corriente de concentrado se le adiciona ácido sulfúrico para mantener el pH acido y minimizar la formación de incrustaciones. Los parámetros de operación típicos para el proceso de electrodiálisis se muestran en la Tabla 12.

Los problemas de operación más comunes para las unidades de electrodiálisis que tratan aguas residuales son la incrustación por presencia de sales de baja solubilidad y el atascamiento o ensuciamiento de la membrana por la materia orgánica coloidal residual que se encuentra en el agua residual tratada. Para reducir el atascamiento se requiere incluir sistemas de filtración adecuados e instalaciones para la limpieza de la membrana. La mayoría de las plantas de electrodiálisis ya incluyen estas instalaciones.

Figura 25

Diagrama de una unidad de electrodiálisis de 2 líneas y 3 etapas en serie



Fuente: (Comisión nacional del agua,2019, p. 383)

Tabla 12

Parámetros De Operación Típicos Para Las Unidades De Electrodiálisis

Parámetro	Unidad	Rango
Carga hidráulica superficial (q)	m3.m-2. d-1	0.8 - 1.0
Agua recuperada	por ciento	75 - 90
Flujo de concentrado	por ciento	Dic-20
Remoción de solidos disueltos totales	por ciento	50 -94
Relación (DC/N) Densidad de corriente a normalidad	(mA.cm-2) (eq-1. L-1)	500-800
Resistencia de la membrana	Ohm	4 - 8
Eficiente de corriente	por ciento	85 -95
Consumo de energía	kWh.m-3	1.5 - 2.6
Energía requerida por kg de sal removida	kWh.m-3.kg-1	1 - 1.2

Fuente: (Comisión nacional del agua,2019, p. 383)

2.4.1.6. Vida útil de las membranas y electrodos. Las membranas de electrodiálisis tienen una vida útil de aproximadamente 10 años. El cuidado y la limpieza de las membranas extienden la vida útil de la misma, y garantiza la calidad del producto y reduce el consumo de energía.

Las membranas catiónicas tienen mayor duración que las aniónicas. Las membranas aniónicas son susceptibles a la oxidación con cloro y otros oxidantes fuertes. Los electrodos tienen una vida útil entre 2 o 3 años. La vida útil del electrodo aniónico es menor que la del catiónico. Los electrodos pueden reacondicionarse. (Comisión nacional del agua,2019, p. 383)

2.4.1.7. Polarización. Medina (2007). La polarización de concentración es un fenómeno que se produce en todos los procesos de separación con membranas. Sin embargo, las características de la polarización en cada una de estas operaciones resultan ser muy diferente.

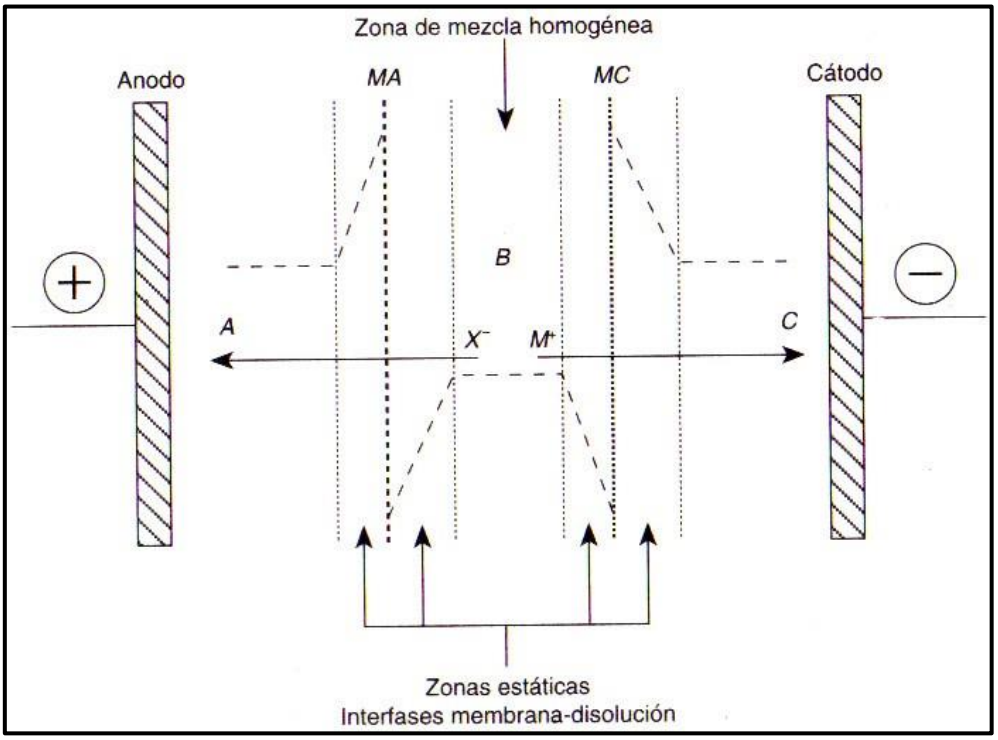
En los procesos de electro-membranas la densidad de trabajo máxima viene determinada por el fenómeno de polarización de la membrana que se produce cuando la concentración de la especie iónica a transportar disminuye por debajo de un nivel crítico, de tal

forma que no es posible mantener la velocidad de transporte impuesta por la intensidad de la corriente. En electrodiálisis es de la misma manera, y el fenómeno tiene lugar cuando un ion se transfiere o descarga sobre la superficie de una interfase sólida, encontrándose sujeto a un valor límite en su transferencia de materia a través de dicha interfase.

El fenómeno que afecta negativamente a la estabilidad de las membranas se ilustra en la figura 26, donde se representa el perfil de concentración en las interfases disolución-membranas en una celda de electrodiálisis de tres compartimentos formada por un ánodo, un cátodo, una membrana de intercambio aniónico y una de intercambio catiónico. (p. 32)

Figura 26

Gradiente de concentración en la interfase membrana-disolución, bajo el efecto de un campo eléctrico. MA y MC: membranas de intercambio aniónico y catiónico. X-: anión. M+: catión. A: anolito. C: catolito. B: disolución acuosa de una sal XM.



Fuente: (Medina,2007, p. 33)

Por el compartimiento B se alimenta una disolución acuosa de una sal XM. En la zona central de este compartimiento la mezcla de la disolución es completa, homogénea. Sin

embargo, conforme las líneas de flujo se aproximan a las interfases disolución-membrana la velocidad lineal de la disolución disminuye, de tal forma que en las proximidades de las membranas existen zonas en las que no hay mezcla (zona estática, capa límite). Por razones idénticas estas zonas existen en las interfases disolución-membrana de los compartimientos A y C, correspondientes respectivamente al analito y al catolito.

Al aplicar una diferencia de potencial entre los electrodos, los aniones X- migran desde B hacia el anolito A a través de la membrana de intercambio aniónico MA, mientras que los cationes M+ migran hacia el catolito C a través de la membrana de intercambio catiónico MC.

Como consecuencia, en las zonas estáticas del compartimento central disminuye la concentración del ion que es transportado con respecto a la de la disolución que alimenta dicho compartimiento:

- El anión X- en la interfase membrana aniónica-disolución.
- El catión M+ en la interfase membrana catiónica-disolución.

Para compensar tal disminución, los iones de la zona de la mezcla homogénea del compartimiento central B migran hacia las zonas estáticas por difusión. En tanto y cuanto la velocidad de difusión sea igual a la de migración de los iones a través de la membrana, impuesta por la corriente eléctrica, se alcanzará una situación de equilibrio.

Sin embargo, si la velocidad de migración a través de las membranas, determinada por la densidad de corriente aplicada, excede a la difusión, la concentración de iones en las zonas estáticas comenzará a disminuir hasta aproximarse a cero. En este momento se produce la polarización por concentración de la membrana. La densidad de la corriente a la que se inicia se denomina densidad de corriente limitante (o corriente límite). Por encima de ella se produce la electrohidrólisis del agua, transportándose H+ a través de la membrana de intercambio catiónico y OH- a través de la membrana de intercambio aniónico.

El resultado neto de la polarización por concentración es:

- Disminución de la concentración de iones en las interfases membrana-disolución de los compartimientos diluidos (compartimiento central B en la figura anterior)
- Aumento de las concentraciones de iones en las interfases membrana-disolución de los compartimientos concentrados (compartimientos anódicos A y catódicos C en la misma figura).

Las consecuencias de la polarización por concentración de trabajar por encima de la densidad de corriente limitante, son:

- Incremento brusco de la resistencia eléctrica de la celda.
- Disminución de la eficacia de la corriente.
- Disminución del pH en el compartimiento diluido y aumento en el compartimiento concentrado.

El aumento de la resistencia eléctrica da lugar a un incremento en el consumo específico de energía del proceso. La disminución de la eficacia de la corriente origina:

- Un mayor consumo específico de energía.
- Una mayor área de membrana para una producción determinada. En definitiva, mayores costes fijos y variables. (pp. 33-34)

Venero (2002). El aumento de resistencia eléctrica da por resultado un aumento de tensión que eventualmente excede de la caída de tensión de las moléculas de agua, produciendo su disociación y llevando así la formación de iones de hidrógeno (H+) y oxhidrilo (OH-).

Cuando ocurre tal disociación de las moléculas de agua, es que se ha alcanzado el punto de polarización. Se hace apreciable la transferencia de iones hidrógeno en el caso de las membranas catiónicas y iones oxhidrilo en el caso de las membranas de intercambio aniónico. La extensión de la transferencia de iones hidrógeno con relación a otros cationes en la superficie de las membranas permeables aniónicas.

La polarización tiene lugar gradualmente y se incrementa a medida que la tensión aplicada a la celda de membranas aumenta y con ello la densidad de corriente.

La polarización, como se ve aquí, tiene lugar solo en los compartimientos de desmineralización, ya que es en estas celdas donde está teniendo lugar el agotamiento. La polarización no tiene lugar de modo significativo en ambos tipos de membranas en forma simultánea. Cuando la polarización se hace de modo pronunciado en una membrana de transferencia aniónica, los iones oxhidrilo son transferidos a la corriente de concentrado, haciéndola alcalina, los iones hidrógeno remanentes en la celda de desmineralización provenientes del agua disociada producen una disminución del pH de la corriente desmineralizada. La polarización de las membranas de transferencia catiónica da como resultado la transferencia de iones hidrógeno a la corriente de concentrado, disminuyendo su pH e incrementando el pH de la corriente desmineralizada. Por otra parte, los cambios de pH de las corrientes del proceso pueden indicar polarización.

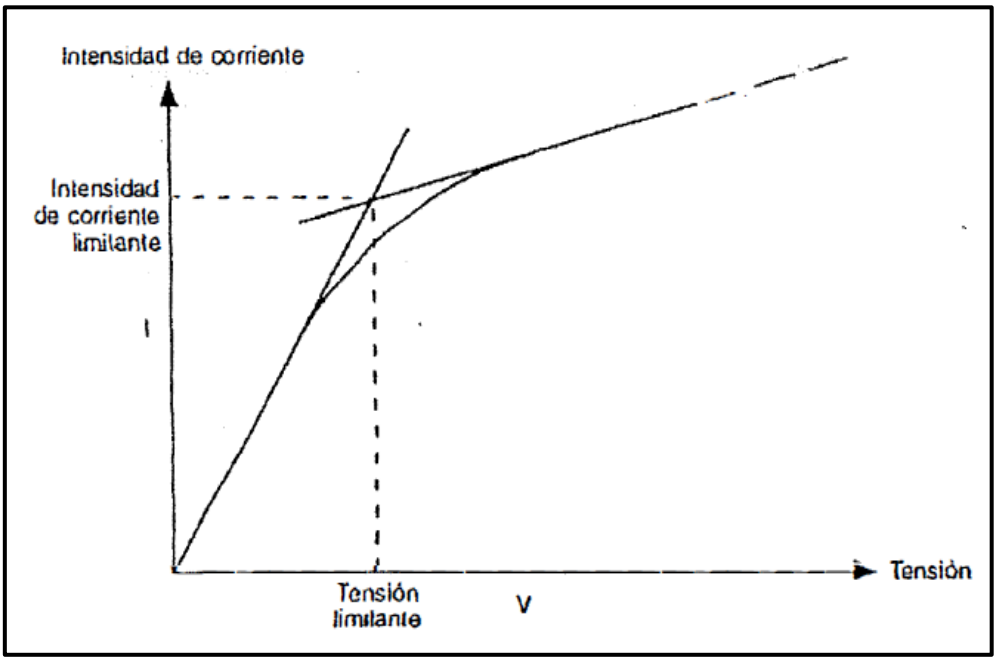
En el diseño de sistemas comerciales de ED/EDI se usa del 70 % al 80% de la densidad de corriente como máximo de densidad de corriente operativa permisible. Esto da un nivel de seguridad razonable en el diseño del sistema. Cuando se trabaja con aguas de muy baja concentración de STD son permisibles corrientes de trabajo más elevadas con relación a la densidad de corriente limitante.

La evaluación de las condiciones de trabajo para un nuevo producto se hace determinando la curva de polarización. El depósito de producto de la unidad ED/EDI se llena con el producto a tratar, y los electrodos de los tanques de salmuera se llenan. El agua del tanque de alimentación pasa a través de la batería de membranas a una tasa de caudal apropiada, mientras la tensión se aumenta progresivamente se mide la corriente en estas condiciones (densidad de corriente limitante). (pp. 48-50)

Una típica curva de polarización se ve en la figura 27.

Figura 27

Curva de Polarización



Fuente: (Venero, (2002, p. 50).

CAPITULO III

Materiales y Métodos

3.1. Descripción de la Celda de Electrodiálisis

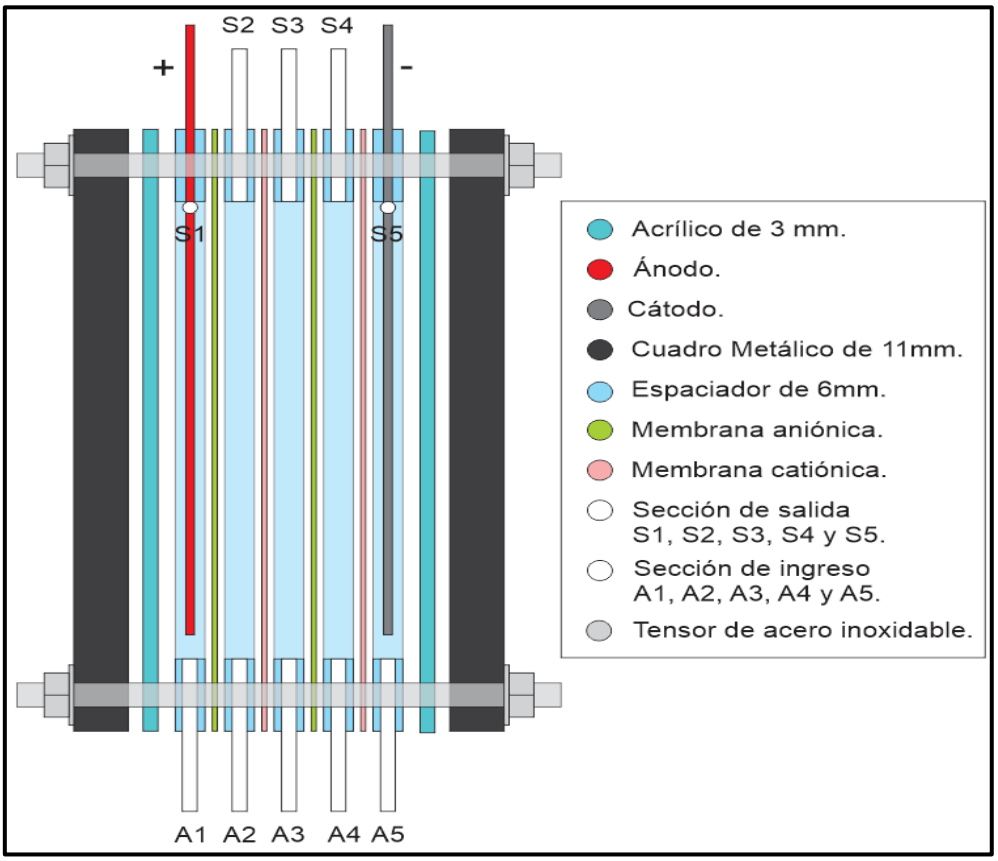
La celda de electrodiálisis es de forma filtro prensa con 5 compartimientos, la cual contiene 5 separadores de poliamida que son los que permiten el paso de agua tanto de alimentación como concentrado las que se ensamblan en forma de pila, conteniendo alternativamente una membrana catiónica y aniónica entre sí.

Los compartimientos del ánodo y del cátodo se diseñaron con el fin de que el cátodo como el ánodo sean ubicados en la parte media de estos, de forma que la salida de la solución sea por el costado del separador siendo “S1 y S5” como se muestra en la Fig. 28. Los compartimientos de diluido y concentrado contienen un ingreso y una salida en la parte inferior y superior como se muestra en la Fig. 28.

La celda contiene en ambos extremos una placa de acrílico de 3 mm que sella el compartimiento del ánodo y cátodo, posterior a ello se tensa con 4 tensores de acero inoxidable los cuales presionan a los cuadros metálicos colocados en los extremos uniformemente para así evitar las fugas posibles de la celda.

Figura 28

Celdas de Equipo Experimental



Fuente: Elaboración propia.

3.1.1. Equipo Experimental

3.1.1.1. Membranas. En el experimento se usaron 2 membranas de intercambio catiónico FTCM-E y dos membranas de intercambio aniónico FTAM-E de un tamaño de 10 x 16 cm, con un área efectiva de 72.7 cm2.

Tabla 13

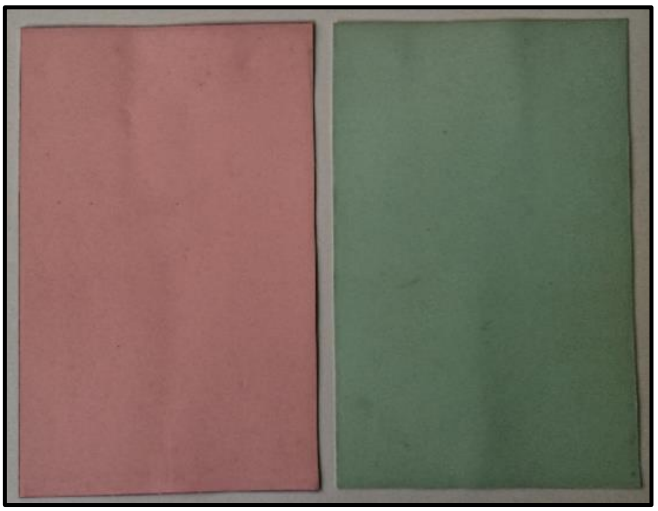
Características De Las Membranas.

Características De La Membrana	FTCM-E	FTAM-E
Resistencia eléctrica especifica (Ω/cm2).	2.5 – 3.5	20.5 – 3.5
Capacidad de intercambio iónico (meq/g membrana).	1.5 – 1.8	1.4 – 1.7
Espesor (mm).	0.17 – 0.19	0.16 – 0.18

Fuente: Elaboración propia

Figura 29

Membrana de intercambio catiónica y aniónica.



Fuente: Elaboración propia

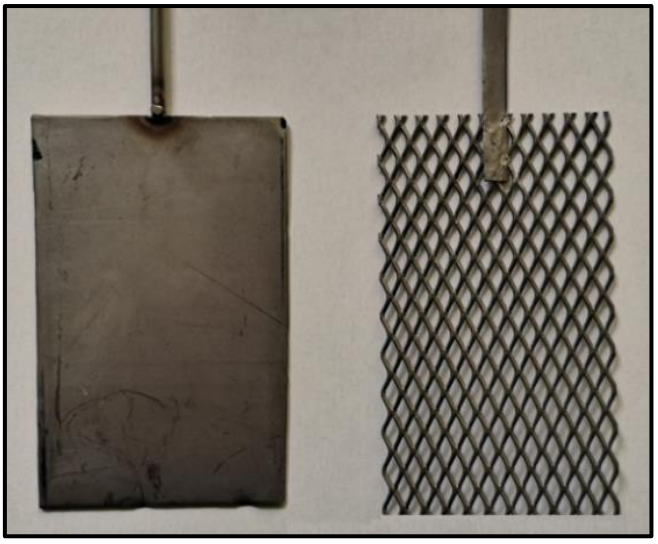
3.1.1.2. Electrodos

- El ánodo es de titanio platinado en forma de malla de 5.3 x 10.3 cm2.
- El cátodo es de acero inoxidable en forma de una placa de 6 x 10 cm2.

Ambos electrodos tienen una prolongación para poder ser conectados a la fuente.

Figura 30

Electrodos



Fuente: Elaboración propia

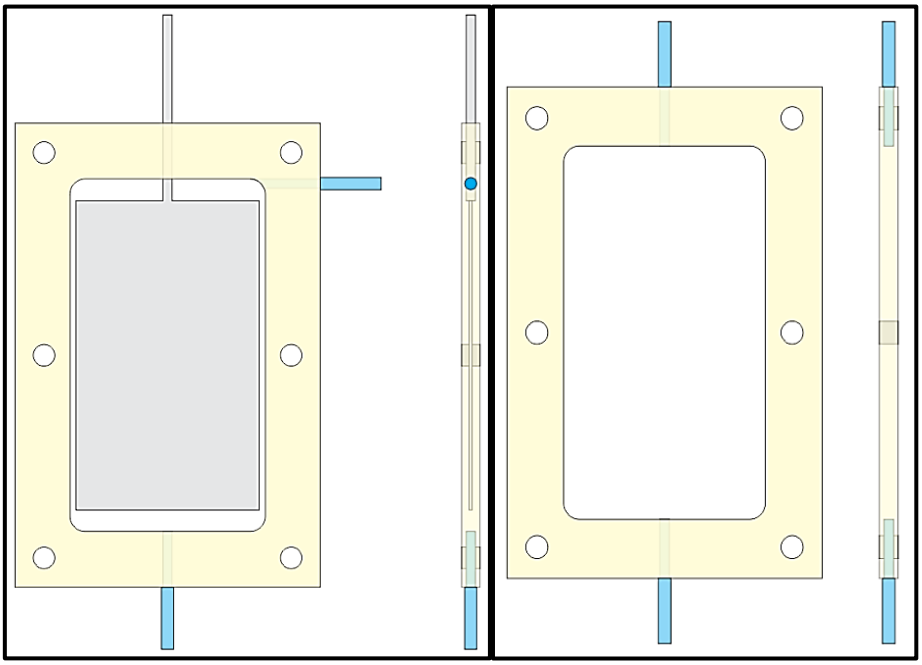
3.1.1.3. Espaciadores. Los espaciadores, fueron construidos de poliamida de un espesor de 6 mm. Todos los espaciadores tienen como dimensiones externas 10 x 15 cm, y tienen orificios en las esquinas y parte lateral para el ingreso de los tensores. Internamente tienen la forma de un rectángulo con curvas redondas.

Los espaciadores que contienen los electrodos tienen en total 3 orificios, el de la parte superior es por donde sale la prolongación del electrodo, el de la parte inferior por donde ingresa el fluido al compartimiento y el orificio lateral permite la salida del fluido.

Los espaciadores que generan los compartimientos de desalado y concentrado tienen 2 orificios, una en la parte inferior y otro en la parte superior que permiten el ingreso y salida del fluido correspondiente.

Figura 31

Espaciadores

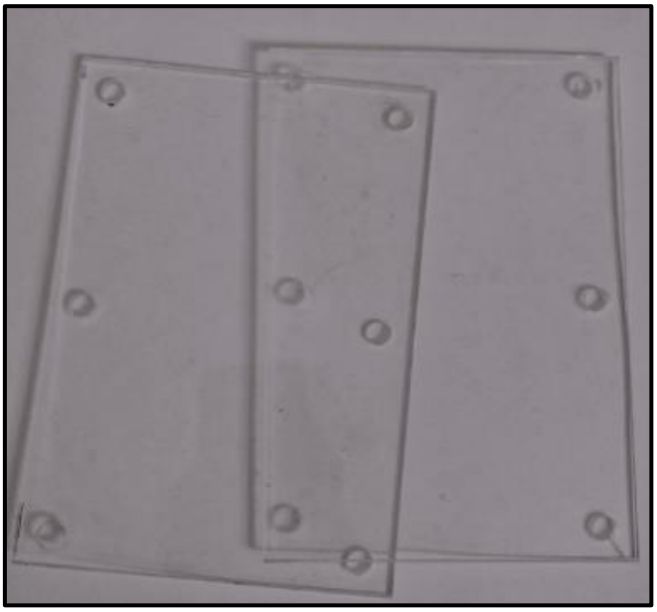


Fuente: Elaboración propia

3.1.1.4. Placa de sellados de espaciadores. La placa de sellado de espaciadores fue construida de acrílico transparente de 3mm, van a los extremos de los espaciadores que contienen a los electrodos.

Figura 32

Placa de sellado de espaciadores

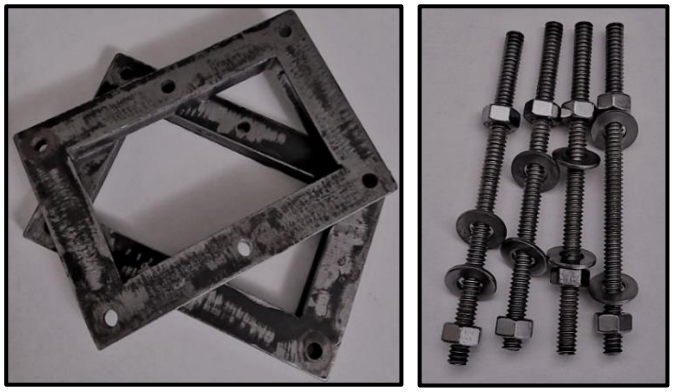


Fuente: Elaboración propia

3.1.1.5. Cuadro metálico y tensores. Los cuadros metálicos que son los presionan uniformemente mediante los tensores toda la pila de espaciadores, membranas y placas, de forma que el fluido que circula dentro de la celda no sale al exterior**.**

Figura 33

Cuadro metálico y tensores.



Fuente: Elaboración propia

3.1.1.6. Bombas peristálticas de 2 canales

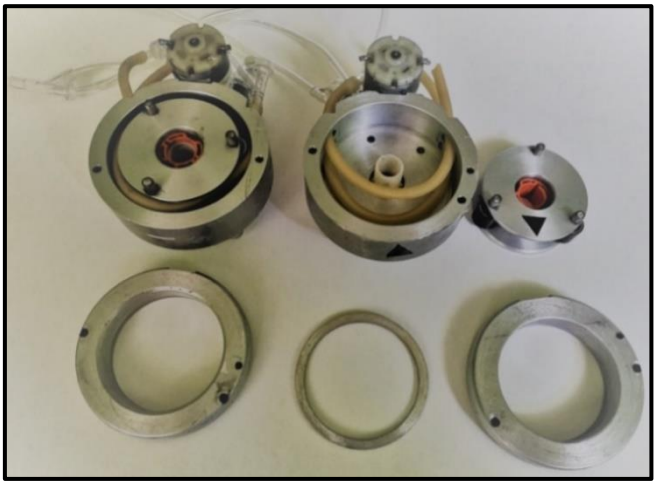
- Cantidad: 2
- Marca: Elaboración Propia

Especificaciones:

- Motor: motor de 24V DC
- Corriente del motor de DC: 0.5-1.4A
- Gama del Flujo: 0 – 31.2 ml/min por canal.

Figura 34

Bombas peristálticas de dos canales



Fuente: Elaboración propia

3.2. Materiales e Instrumentos de Medición:

- Reactivos químicos: Los reactivos químicos que fueron utilizados son:
  - 100 gramos de cloruro de sodio grado reactivo.
  - 4 L de agua destillada.
- Materiales de vidrio
  - Dos probetas Pyrex de 10 ml.
  - 3 vasos de precipitado Pyrex de 100, 200, 250 ml.
  - Varilla de agitación de 20 cm.
  - Matraz Pyrex de 1000 ml.

- Instrumentos de medición
  - Conductímetro
    - Marca: HANNA INSTRUMENTS
    - Modelo: HI98312
    - Rango: 0.00 a 20.00 mS/cm y 0.00 a 10.00 g/l (ppt)
    - Precisión: ±2% F.S.
    - Condiciones ambientales: 0 a 50°C (32 a 122°F); HR máx. 100%

Figura 35

Conductímetro

Fuente: Elaboración propia

  - Multímetro
    - Marca: PRASEK
    - Modelo: PR-103
    - AC Corriente: 20A/200A/600A
    - AC Voltaje: 2V/20V/200V/600V
    - DC Voltaje: 200mV/2V/20V/200V/600V

Figura 36

Multímetro

Fuente: Elaboración propia

– Fuente de alimentación

- Marca: UNI-T
- Modelo: UTP3313TFL
- Voltaje en la salida: 0-30 V
- Corriente en la salida: 0-3 A

Figura 37

Fuente de alimentación

Fuente: Elaboración propia

3.3. Metodología de la Experimentación

3.3.1. Recolección de Muestras

Para la realización de las pruebas se tomaron 3 muestras de agua subterránea de diferentes puntos de Arequipa (parque industrial Arequipa, Characato, Pachacútec).

Así mismo se hizo análisis de estas muestras en el laboratorio de investigación y servicios LABINVSERV de la Universidad Nacional de San Agustín Arequipa (UNSA) para determinar la composición inicial de las muestras. Los resultados obtenidos correspondientes al análisis solicitado se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 14

Composición Inicial De Aguas Subterráneas

	Parque industrial		Characato	Pachacutec	Método De Ensayo Aplicado
Análisis De:	Unidad	Resultados	Resultados	Resultados	Norma/Referencia/Nombre
pH	-	7.14	7.41	7.72	Método AOAC
Conductividad	µS/cm	604	506	1424	Método de la AOAC
Cloruros	mg/L	65.02	45.72	166.37	Método Mercurimetro (1,2) 33.067 de la AOAC
Sulfatos	mg/L	90.4	106	484	Método Turbidímetro (1,2) de la AOAC
Alcalinidad Total	mg/L CaCO3	117.85	80.13	94.28	Método Volumétrico
Dureza Total	mg/L	191.69	185	318.58	Método Gravimétrico

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.2. Procedimiento de Operación del Módulo

Se abastece 250 ml de agua subterránea a cada uno de los tanques de alimentación T1, T2 y T3 los cuales alimentan los compartimientos del módulo de electrodiálisis.

El tanque T1 abastece mediante una bomba peristáltica a un flujo regulable de (19.2 a 31.2) ml/min al compartimiento 2 y 4 (diluido) conectados entre sí; la salida del compartimiento 4 retorna al T1 formando un sistema de recirculación.

El tanque T2 abastece mediante una bomba peristáltica a un flujo regulable de (19.2 a 31.2) ml/min al compartimiento 3 (concentrado) la cual su salida retorna al tanque T2 formando un sistema de recirculación.

El tanque T3 abastece mediante una bomba peristáltica a un flujo regulable de (19.2 a 31.2) ml/min al compartimiento 1 y 5 (electrodos) conectados entre sí; la salida del compartimiento 5 retorna al tanque T3 formando un sistema de recirculación

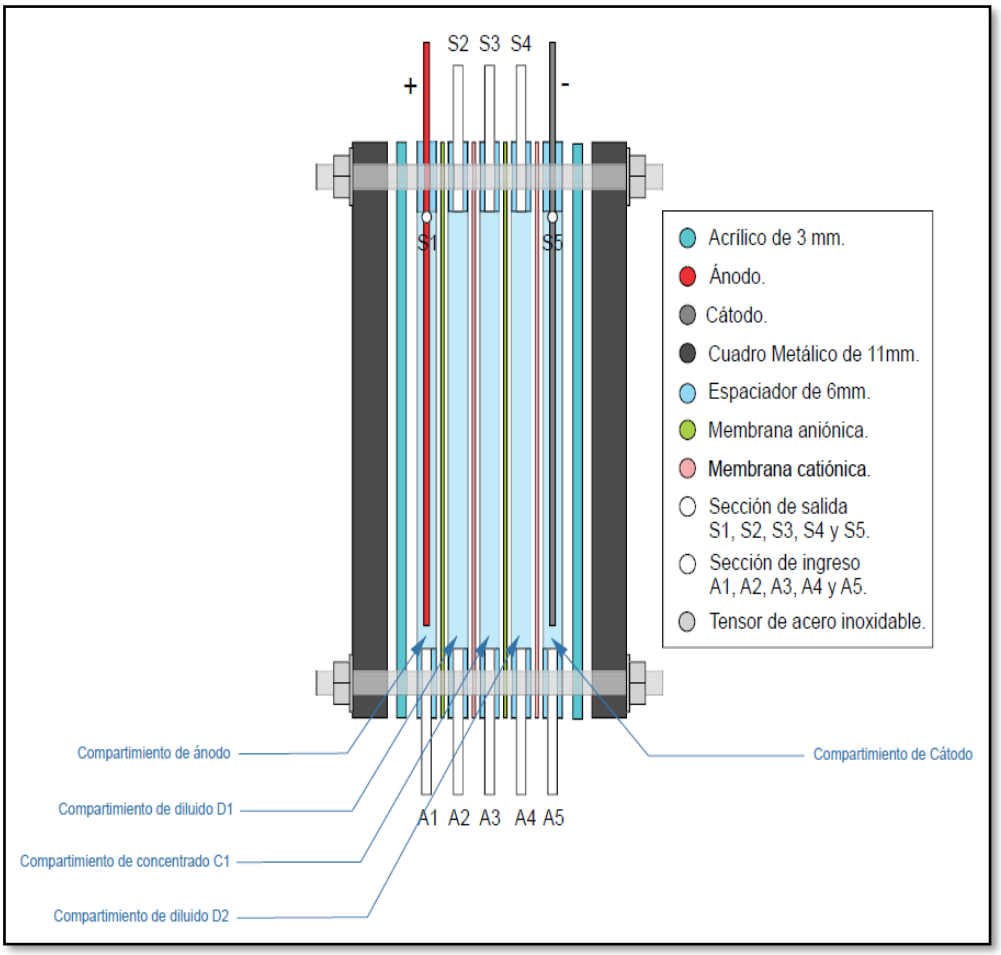
Para analizar la conductividad a través del tiempo se recoge muestras del tanque T2 y se regresa después de tomar la conductividad para evitar ciertas variaciones de volumen del recipiente.

Después de cada prueba, el módulo fue desmontado cuidadosamente y lavado en su totalidad con agua destilada, el tiempo de corridas de cada prueba fue de 125 minutos, se empleó una fuente de corriente directa donde se visualiza la corriente eléctrica.

La conductividad correspondiente al compartimiento de diluido se determinó mediante un conductímetro y se realizó la medida de conductividad e intensidad durante un intervalo de tiempo menor a mayor, durante la prueba.

Figura 38

Diagrama de celdas de equipo experimental



Fuente: Elaboración propia.

3.4. Diseño Experimental Taguchi

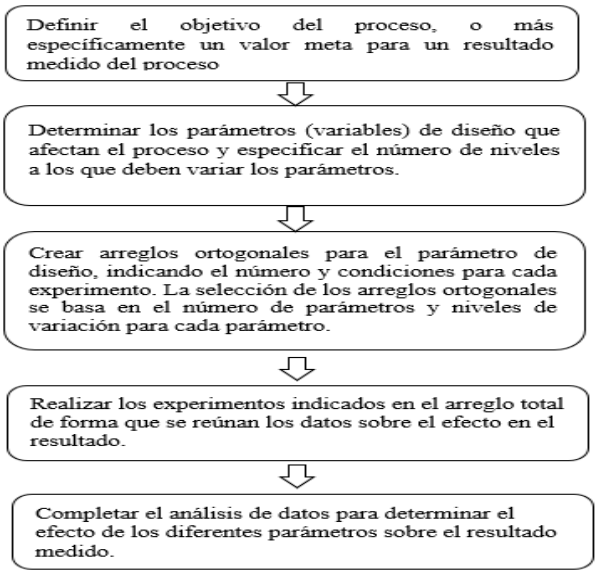
El diseño experimental propuesto por Taguchi involucra emplear arreglos ortogonales para organizar los parámetros que afectan el proceso y los niveles a los cuales estos deben variarse. En lugar de tener que ensayar todas las posibles combinaciones como se efectúa en el diseño factorial, el método Taguchi ensaya pares de combinaciones. Esto permite hacer la colección de los datos necesarios para determinar qué factores afectan más la calidad del producto con una cantidad mínima de experimentación, ahorrando tiempo y recursos. El método Taguchi se emplea mejor cuando hay un número de variables (3 a 50), pocas interacciones entre las variables y cuando solamente unas pocas variables contribuyen significativamente.

Los arreglos se seleccionan de acuerdo al número de parámetros (variables) y al número de niveles (estados). El análisis de varianza de los datos recolectados a partir del diseño experimental de Taguchi se puede emplear para seleccionar nuevos valores de parámetros para optimizar el rendimiento.

Las etapas involucradas en el método Taguchi son las siguientes:

Figura 39

Etapas del método de Taguchi



Fuente: elaboración propia

Conociendo el número de parámetros y el número de niveles se puede elegir el adecuado arreglo ortogonal. Empleando la Tabla selectora de arreglos que se muestra a continuación, el nombre del adecuado arreglo se puede encontrar mirando la columna y fila correspondientes al número de parámetros y al número de niveles. Una vez determinado el nombre (el subíndice representa el número de experimentos que deben ser realizados).

Los arreglos son creados empleando un algoritmo desarrollado por Taguchi y permite que cada variable y conjunto sean ensayados equitativamente. Por ejemplo, si se tienen tres parámetros (voltaje, flujo de alimentación, concentración) y tres niveles (alto, medio, bajo), se puede concluir que el arreglo adecuado es L9.

Al examinar este arreglo se puede ver que se tienen 9 diferentes experimentos.

Tabla 15

Diseño De Experimentos Taguchi

		Número de Parámetros				
		2	3	4	6	7
Número de Niveles	2	L4	L4	L8	L8	L8
	3	L9	L9	L18	L18	L18
	4	L’16	L´16	L´16	L´16	L´32

Fuente: elaboración propia

Se seleccionó un arreglo ortogonal L9 (3 3), permitiéndonos estudiar 3 factores a 3 niveles diferentes, en la tabla 16. Se observa los factores estudiados, sus respectivos niveles.

Tabla 16

Arreglo Ortogonal L9

		Niveles		
Parámetros	Unidad	Bajo	Medio	Alto
Conductividad.	mS/cm	0.44	0.55	1.28
Potencial eléctrico.	V	4	8	12
Flujo de recirculación.	ml/ min	19.2	26.4	31.2

Fuente: elaboración propia

3.4.1. Matriz de Experimentos

Tabla 17

Matriz De Experimentos.

N	X1	X2	X3	Y
1	0.44 mS/cm	4V	19.2 ml/min	?
2	0.44 mS/cm	8V	26.4 ml/min	?
3	0.44 mS/cm	12V	31.2 ml/min	?
4	0.55 mS/cm	4V	26.4 ml/min	?
5	0.55 mS/cm	8V	31.2 ml/min	?
6	0.55 mS/cm	12V	19.2 ml/min	?
7	1.28 mS/cm	4V	31.2 ml/min	?
8	1.28 mS/cm	8V	19.2 ml/min	?
9	1.28 mS/cm	12V	26.4 ml/min	?

Fuente: elaboración propia

3.4.2. Procesamiento de Datos

El análisis estadístico de los resultados de las pruebas experimentales se efectuó mediante el software Minitab; mediante su aplicación se obtuvieron gráficas, diagramas y la obtención de la variable más influyente en el porcentaje de des ionización.

3.5. Procedimiento para la Determinación de la Densidad de Corriente

Se determinó la densidad de corriente limite empleando el método de la curva de polarización, para ello se hicieron mediciones de voltaje aplicado a la celda de electrodiálisis y la corriente que fluye por la celda de electrodiálisis, para un flujo de alimentación correspondiente al diluido de 19.2 ml/min, 26.4 ml/min y 31.2 ml/min, por lo cual el voltaje aplicado de la fuente se incrementó en 2 voltios cada 4 minutos.

Luego se graficaron los datos obtenidos: Intensidad de corriente vs. Voltaje, para poder obtener la curva de polarización, se determinó la densidad de corriente límite, que es la máxima cantidad de corriente que puede circular a través de una determinada área del electrodo sin que se produzca un brusco incremento de su resistencia eléctrica o una drástica disminución.

3.6. Procesamiento para la Determinación del Porcentaje de Desalinización

Se determino el porcentaje de desalinización a partir de las lecturas obtenidas de conductividad en el tiempo, correspondiente al compartimiento de diluido mediante la ecuación:

$$\% D = \frac{\sigma_o - \sigma}{\sigma_o} x\ 100$$

σ_o = Conductividad Inicial.

σ = Conductividad medida en el tiempo (min).

CAPITULO IV

Presentación y Análisis de Resultados

4.1. Determinación de Corriente Limite

En las tablas 18, 19 y 20 se muestran las lecturas de intensidad de corriente y voltaje, con un flujo de alimentación correspondiente al diluido de 19.2 ml/min, 26.4 ml/min y 31.2 ml/min correspondientemente.

Tabla 18

Lectura De Intensidad De Corriente Y Voltaje Con Flujo De Alimentación De 19.2 Ml/Min Y Conductividad Inicial De 1.28 Ms/Cm.

Tiempo (min)	Voltaje (V)	Corriente (Amp)
0	0	0
4	2	0
8	4	0.02
12	6	0.0525
16	8	0.0625
20	10	0.0875
24	12	0.1125
28	14	0.135
32	16	0.1625
36	18	0.2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19

Lectura De Intensidad De Corriente Y Voltaje: Flujo De Alimentación Del Diluido De 26.4 Ml/Min Y La Conductividad Inicial De 1.28 Ms/Cm.

Tiempo (min)	Voltaje (V)	Corriente (Amp)
0	0	0
4	2	0.01
8	4	0.03
12	6	0.06

Tiempo (min)	Voltaje (V)	Corriente (Amp)
16	8	0.0825
20	10	0.095
24	12	0.1025
28	14	0.1225
32	16	0.15
36	18	0.19

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20

Lectura De Intensidad De Corriente Y Voltaje: Flujo De Alimentación Del Diluido De 31.2 Ml/Min Y La Conductividad Inicial De 1.28 Ms/Cm

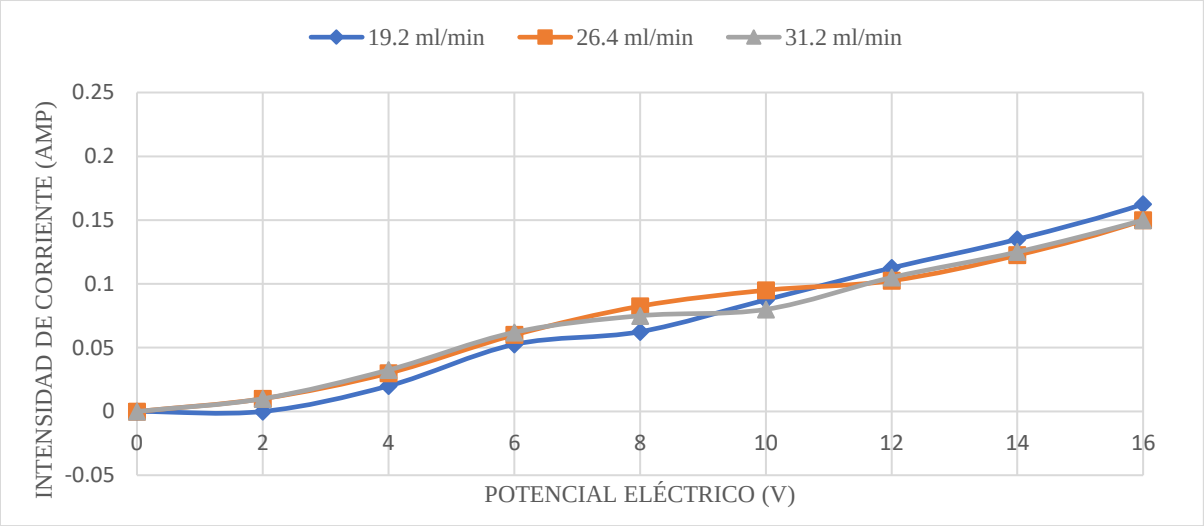
Tiempo (min)	Voltaje (V)	Corriente (Amp)
0	0	0
4	2	0.01
8	4	0.0325
12	6	0.062
16	8	0.075
20	10	0.08
24	12	0.105
28	14	0.125
32	16	0.15
36	18	0.18

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la corriente limite se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la figura 40 donde puede observarse que el corriente límite para una conductividad de 1.28 mS/cm a un flujo de 19.2 ml/min es aproximadamente de 0.0625 Amp, para una conductividad de 1.28 mS/cm a un flujo de 26.4 ml/min es aproximadamente de 0.095 Amp, para una conductividad de 1.28 mS/cm a un flujo de 31.2 ml/min es aproximadamente de 0.125 Amp.

Figura 40

Potencial eléctrico (V) vs. Intensidad de corriente (mA).



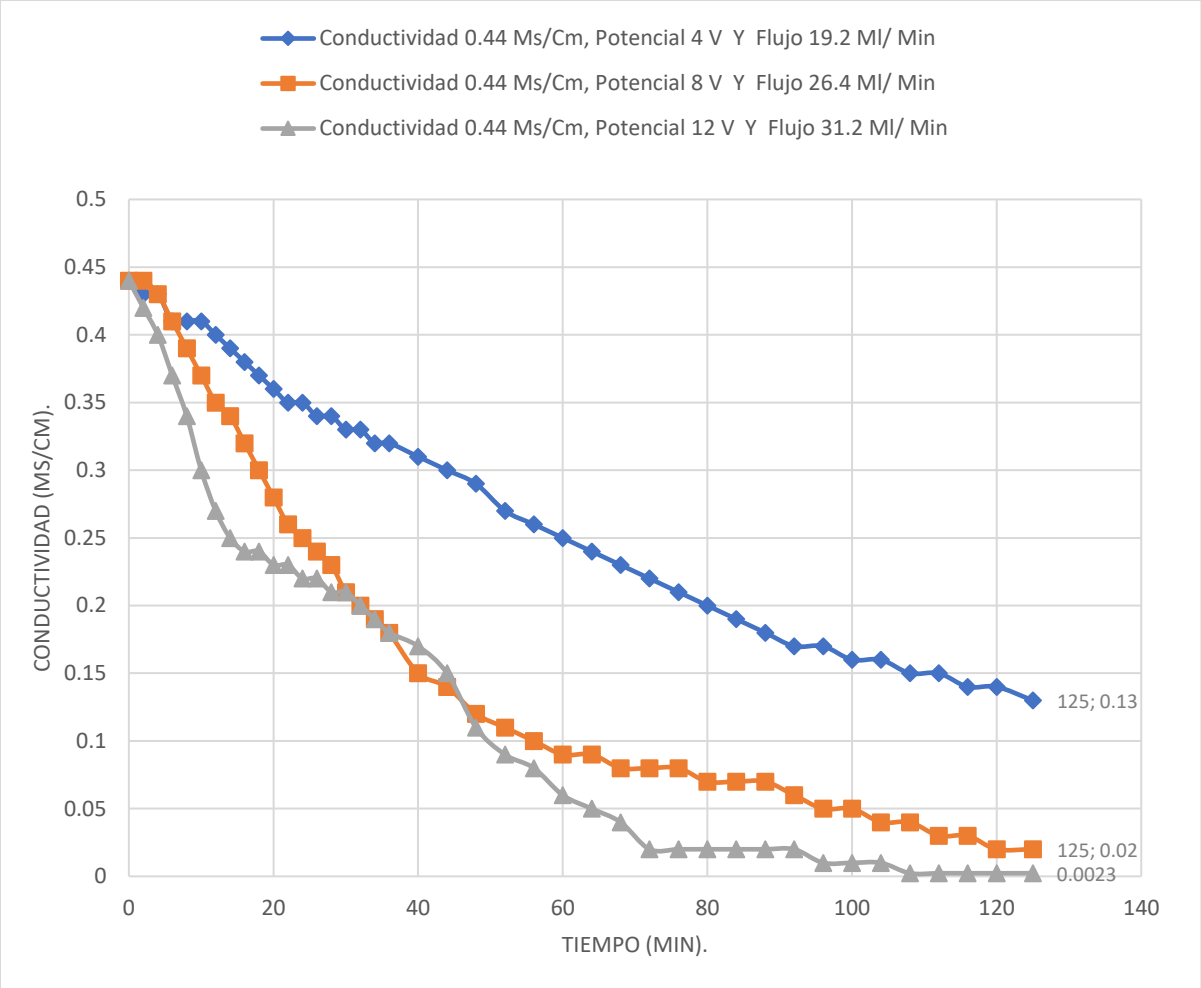
Fuente: Elaboración propia.

4.2. Determinación de Conductividad del Tanque de Diluido en Función del Tiempo de Operación

Tal como se señaló en la matriz experimental se realizaron 9 corridas, donde se determinó la conductividad en el tanque de diluido a diferentes condiciones de operación, teniendo como tiempo de operación 125 minutos.

Figura 41

Conductividad (mS/cm) Vs Tiempo (min) – Corridas 1,2,3.



Fuente: Elaboración propia.

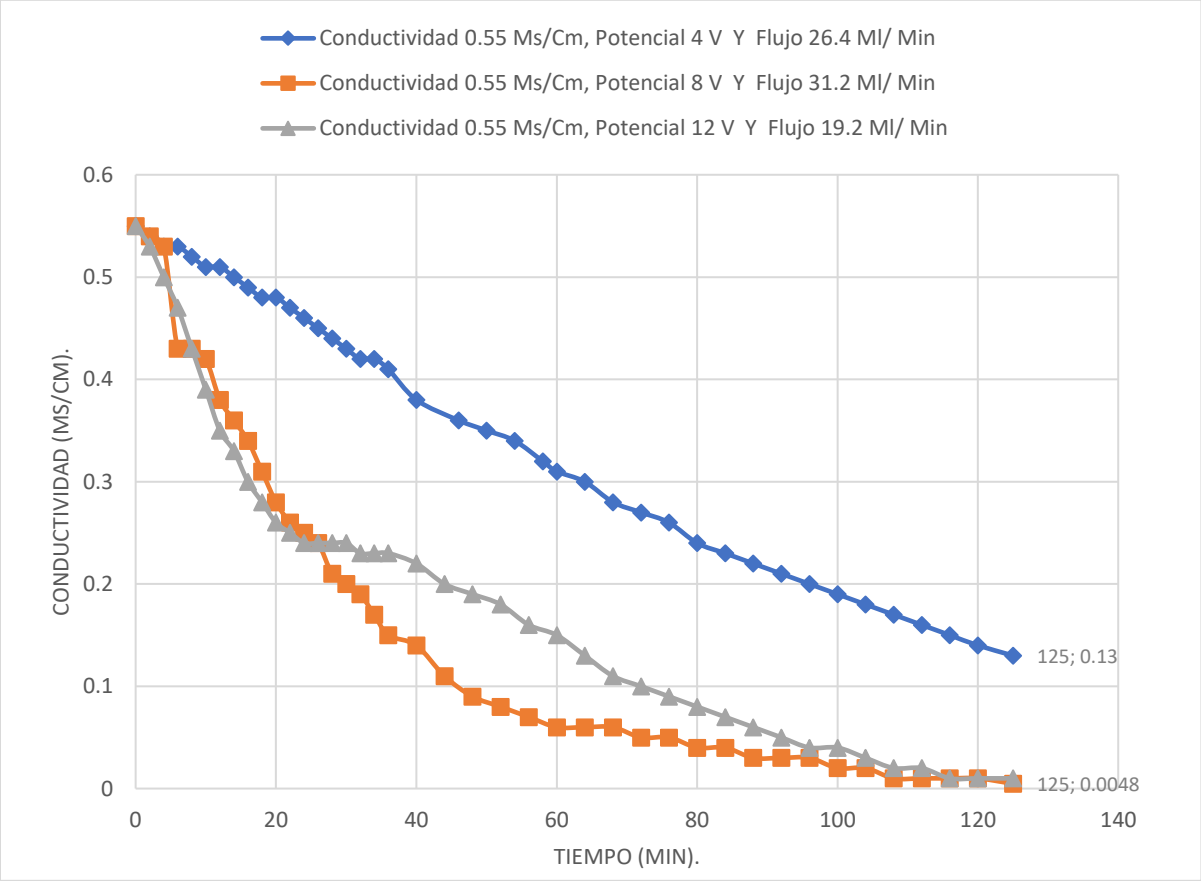
Como se observa en la figura 41, las corridas experimentales 1,2 y 3 las cuales pertenecen al agua subterránea de conductividad 0.44 mS/cm, donde se percibe la variación de la conductividad en el tanque de diluido cuando varía el potencial eléctrico aplicado y el flujo de alimentación, teniendo como resultado:

– Para la corrida número 1 a las condiciones de potencial de 4V y flujo de recirculación 19.2 ml/min; se evidencia el paso de los iones de una forma más lenta a comparación de la corrida 2 y 3, siendo su conductividad final 0.13 mS/Cm a un tiempo de operación de 125 minutos.

- Para la corrida número 2 a las condiciones de potencial 8V y flujo de recirculación de 26.4 ml/min; se evidencia el paso de los iones de una forma más rápida a comparación de la corrida 1, siendo su conductividad final de 0.02 mS/Cm a un tiempo de operación de 125 minutos, esto se debe al incremento de potencial eléctrico y flujo de alimentación.
- De la misma manera para la corrida número 3 a las condiciones de potencial de 12V y flujo de recirculación de 31.2 ml/min; se evidencia el paso de los iones de una forma más rápida a comparación de la corrida 1 y 2, teniendo una mayor recuperación de iones, siendo su conductividad final de 0.0023 mS/Cm a un tiempo de operación de 125 minutos.

Figura 42

Conductividad (mS/cm) Vs Tiempo (min) - Corridas 4,5 y 6.



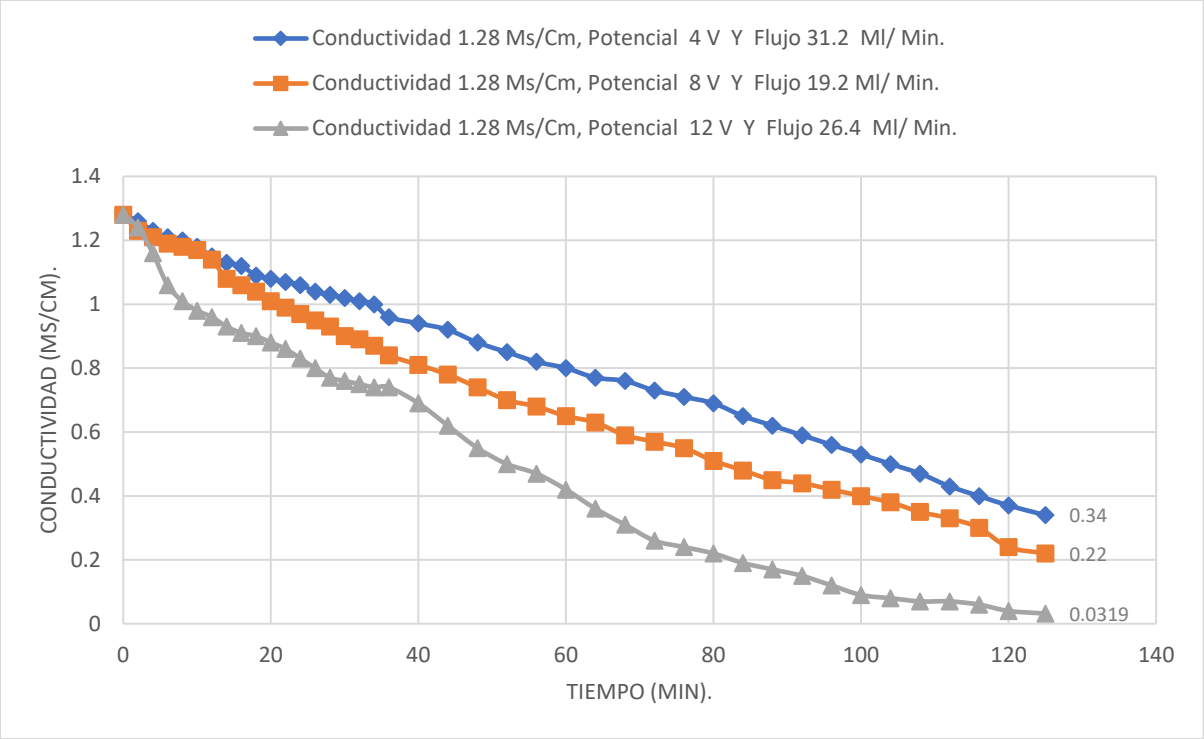
Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura 42, las corridas experimentales 4,5 y 6 las cuales pertenecen al agua subterránea de conductividad 0.55 mS/cm, donde se percibe la variación de la conductividad en el tanque de diluido cuando varía el potencial eléctrico aplicado y el flujo de alimentación, teniendo como resultado:

1. Para la corrida número 4 a las condiciones de potencial de 4V y flujo de recirculación 26.4 ml/min; se evidencia el paso de los iones de una forma más lenta a comparación de la corrida 2 y 3, siendo su conductividad final 0.13 mS/Cm a un tiempo de operación de 125 minutos.
2. Para la corrida número 5 a las condiciones de potencial 8V y flujo de recirculación de 31.2 ml/min; se evidencia el paso de los iones de una forma más rápida a comparación de la corrida 4 y 6, teniendo una mayor recuperación de iones, siendo su conductividad final de 0.0048 a un tiempo de operación de 125 minutos, gráficamente podemos observar que un flujo elevado presenta una mayor recuperación de iones.
3. De la misma manera para la corrida número 6 a las condiciones de potencial de 12V y flujo de recirculación de 19.2 ml/min; se evidencia el paso de los iones de una forma más rápida a comparación de la corrida 4 y menor a comparación de la corrida 5, siendo su conductividad final 0.01 mS/Cm a un tiempo de operación de 125 minutos.

Figura 43

Conductividad (mS/cm) Vs Tiempo (min) - Corridas 7,8,9.



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura 43, las corridas experimentales 7,8 y 9 las cuales pertenecen al agua subterránea de conductividad 1.28 mS/cm, donde se percibe la variación de la conductividad en el tanque de diluido cuando varía el potencial eléctrico aplicado y el flujo de alimentación, teniendo como resultado:

- Para la corrida número 7 a las condiciones de potencial de 4V y flujo de recirculación 31.2 ml/min; se evidencia el paso de los iones de una forma más lenta a comparación de la corrida 8 y 9, siendo su conductividad final 0.34 mS/Cm a un tiempo de operación de 125 minutos.
- Para la corrida número 8 a las condiciones de potencial 8V y flujo de recirculación de 19.2 ml/min; se evidencia el paso de los iones de una forma más rápida a comparación de la corrida 7, siendo su conductividad final de 0.3 mS/Cm a un tiempo de operación de 125 minutos.

- De la misma manera para la corrida número 9 a las condiciones de potencial de 12V y flujo de recirculación de 26.4 ml/min; se evidencia el paso de los iones de una forma más rápida a comparación de la corrida 7 y 8, teniendo una mayor recuperación de iones, siendo su conductividad final de 0.0319 a un tiempo de operación de 125 minutos.

4.3. Análisis e Interpretación de Resultados

Tabla 21

Comparativa de composición inicial y final de aguas subterráneas

		Parque Industrial De Arequipa		Characato		Pachacútec	
Análisis	Unidad	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Ph	--	7.14	6.26	7.41	6.48	7.72	5.88
Conductividad	µS/cm	604	4.80	506	2.30	1424	31.90
Cloruros	mg/L	65.02	0.50	45.72	1.01	166.37	3.55
Alcalinidad total	mg/L CaCO3	117.85	1,95	80.13	0.58	94.28	1.17
Dureza total	mg/L	191.69	2,17	185	0.54	318.58	2.17

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22

Porcentaje de deionización

Conductividad (mS/cm)	Potencial eléctrico (v)	Flujo (ml/ min).	% D
0.44	4	19.2	70.45%
0.44	8	26.4	95.45%
0.44	12	31.2	99.48%
0.55	4	26.4	76.36%
0.55	8	31.2	99.13%
0.55	12	19.2	98.18%
1.28	4	31.2	73.44%
1.28	8	19.2	76.56%
1.28	12	26.4	97.51%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23

Tabla de Respuesta para medias

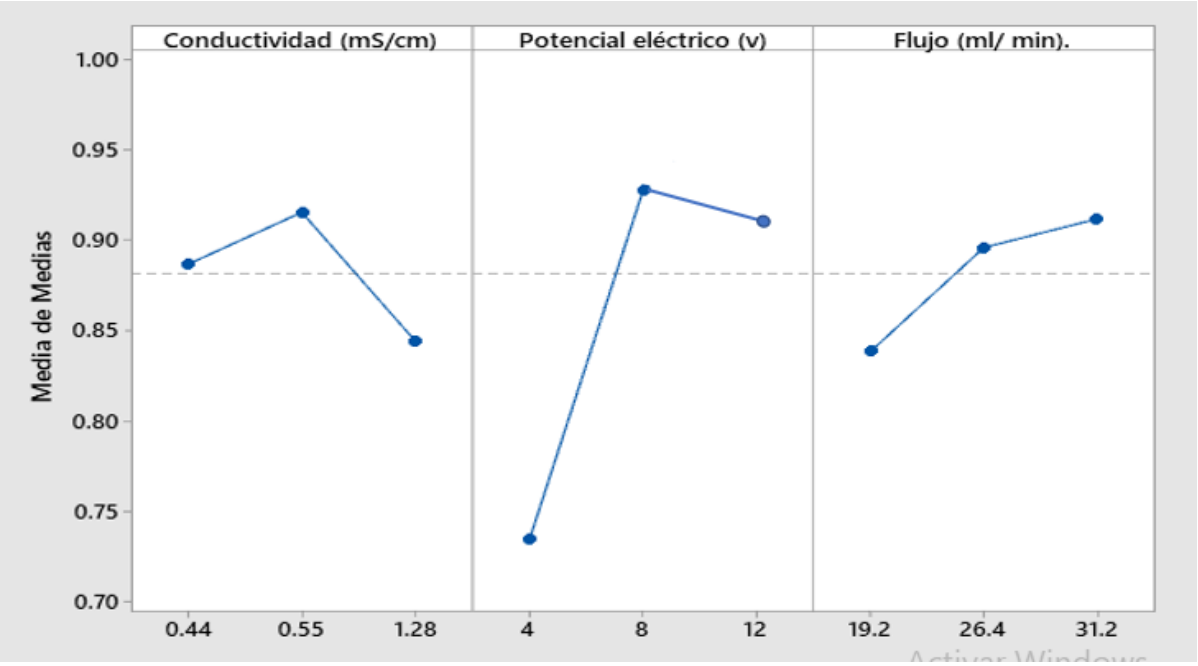
Nivel	Conductividad (mS/cm)	Potencial Eléctrico (v)	Flujo (ml/min).
1	0.8864	0.7342	0.8382
2	0.9152	0.9276	0.8956
3	0.8438	0.9185	0.9115
Delta	0.0714	0.2493	0.0733
Clasificar	3	1	2

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 23 se presenta los efectos principales de las variables de control sobre el porcentaje de des ionización, donde "Clasificar" es la magnitud de influencia de la variable sobre el porcentaje de deionización(%D). La magnitud de influencia, muestra que la variable que más afecta es el Potencial eléctrico en primer lugar, seguido por el flujo de alimentación y por último la conductividad.

Figura 44

Gráfica de efectos principales para Medias



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 44 presenta los valores medios del potencial eléctrico, flujo de alimentación y conductividad con respecto al %D. En la figura, el eje X indica el valor de los parámetros mencionados y el eje Y indica el %D.

Se observa en la figura 44 los valores de medias más altos para cada parámetro, éstos son los valores que indican con que parámetros se puede operar el equipo para obtener un mayor porcentaje de deionización(%D) los cuales son: potencial eléctrico de 12 voltios, conductividad de 0.55 mS/Cm, y flujo de recirculación de 31.2 ml/min. Esta combinación de parámetros coincide con el experimento 5 de los ensayos realizados.

Conclusiones

1 Se evaluaron los parámetros de operación del módulo de electrodiálisis para el tratamiento de aguas subterráneas de Arequipa, De los tres parámetros de operación se determinó el más significativo en el sistema siendo el potencial eléctrico el más influyente, dando buen resultado en las aguas del Parque Industrial de Arequipa donde se redujo a 2.17 mg/l la dureza total y se logró un porcentaje de desalinización del 99.13%.

2 Se construyó un módulo de electrodiálisis tipo filtro Prensa con espaciadores y marcos metálicos de dimensiones 15 x 10 cm a escala de laboratorio, con 05 compartimientos y 04 unidades de membranas iónicas selectivas, se implementó bombas peristálticas aportando un buen funcionamiento al módulo.

3 Se determinaron los parámetros de operación óptimos del módulo de electrodiálisis a nivel laboratorio, los cuales requieren un voltaje de operación de celda de 8 V, un flujo de 31.2 ml/min y conductividad eléctrica de 0.55 mS/cm.

4 Se determinó el porcentaje de desalinización de las aguas subterráneas siendo del 99.13%, 99.02% y 97.51 % correspondientes al Parque industrial de Arequipa, Characato y Pachacutec respectivamente, demostrándose que por medio del módulo y la técnica de electrodiálisis se puede desmineralizar aguas subterráneas con contenidos altos de sales y de dureza, a través del uso de membranas, siendo una alternativa para el ablandamiento de agua.

Recomendaciones

1 Se recomienda diseñar módulos semejantes y realizar el estudio con mayor cantidad de membranas y determinar el efecto de estas para lograr un proceso más eficiente, así mismo considerar el efecto de otros parámetros como Temperatura, Ph, según el tipo de solución a estudiar.

2 Se recomienda realizar el estudio de la Intensidad de corriente límite con el módulo diseñado con fines académicos usando métodos como Curva de polarización ó Curvas de Cowan y Brown, y determinar experimentalmente el valor de intensidad de corriente limite realizando un análisis sobre los fenómenos de transferencia de iones que se dan en procesos con membranas de intercambio iónico.

3 Se recomienda la implementación de un sistema continuo de lavado de membranas y electrodos y realizar la automatización de equipo para monitorear el concentrado, y cambios de pH y temperaturas.

Bibliografía

- Casells, A. (2014). *Proyecto de recuperación electrolítica de Cr (VI) Mediante el uso de reactores electroquímicos en presencia de membranas cerámicas modificadas con óxidos de zirconio*. [trabajo de fin de grado, Universidad Politécnica de Valencia. España]

- Castillo, A., & Lucas, L. (2015). *Evaluación de los parámetros operacionales en un equipo de electrodiálisis para recuperación de iones de níquel a partir de efluentes galvánicos*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo. Perú].

- Collazo, M., Montaño, J. (2012). *Manual de Agua subterránea. El agua subterránea*, (1ra ed., pp. 16,26-27).
Recuperado de http://aquabook.agua.gob.ar/files/upload/contenidos/10_2/Manual-de-agua-subterranea-Uruguay.pdf

- Comisión nacional del agua (2019). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: zonas rurales, periurbanas y desarrollos ecoturisticos.* Coyoacán, México, D.F: secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
Recuperado de https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro31.pdf

-Dévora, E, &Gonzales-Enríquez, R &Saldívar, J (2008). *Diseño de procesos de desalinización de aguas subterráneas salobres mediante simulación química de electrodiálisis reversible, con propósito de consumo humano*. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales. 5(1),31-41.

- Huamán, M. (2015). *Evaluación de la calidad del agua subterránea para consumo humano en el pueblo Cerrito San Juan, distrito de Socabaya, provincia de Arequipa,*

departamento de Arequipa. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú].

- López, U. (2005). *Aplicación de la electrodiálisis a la eliminación de nitrato en agua*. [Tesis de maestría, Centro de investigaciones y desarrollo tecnológico en electroquímica, Querétaro, México].

- Martínez, G. (2012). *Evaluación de dos agentes ablandadores de agua y su mezcla para ajustar el índice de Langelier en recirculación de aguas de enfriamiento y estabilizar parámetros químicos en calderas de vapor*. [Tesis de pregrado, Universidad de san Carlos de Guatemala, Guatemala].

- Medina, J. (2009). *Desarrollo de módulos de electrodiálisis para la desalinización de aguas salobres, determinación de parámetros físicos y evaluación experimental de modelo difusional*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú].

- Medina, I. (2007). *Tratamiento de aguas de producción con electrodiálisis*. [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela].

- Miño, S. (2005). *Evaluación preliminar del proceso de electrodiálisis como alternativa para la recuperación de metales pesados en la industria galvánica-estudio para níquel* [Tesis de maestría, Universidad de los andes, Bogotá Colombia].

-Núñez, A (2018). *Remoción de cromo de efluentes de la industria curtiembre mediante electrodiálisis*. Industrial Data. Vol.2, (número 1), Recuperado el 11 de mayo del 2018 de https://www.redalyc.org/jatsRepo/816/81658059004/html/index.html.

-Ortiz, A., & Talavera, C. (2013). *Tratamiento de agua para alimentación de calderas* [Tesis de pregrado, Escuela superior de ingeniería química e industrias extractivas, México, D.F].

-Sahuaquillo, A. (2009). *La importancia de las aguas subterráneas*. Real Academia de ciencias Exactas, Físicas y Naturales.103(1), 97-114.

-Sánchez, F., & García, H. (2007). *Ventaja técnica y económica de las tecnologías de membranas con respecto al intercambio iónico en el tratamiento de agua para calderas de presiones menores de 400 psig*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima. Perú].

-Sincal calderas industriales, (2018). Información técnica ITSI-03 Calidad del agua de calderas (VERSION 1,00)

Recuperado de http://www.sincal.es/descargas/calidad-de-agua-de-calderas.pdf

-Torres Rodríguez, L. M., Montes Rojas, A., Vázquez Rodríguez, G. y Pérez Díaz, E. (2019). *Uso de curvas de polarización para entender el transporte de iones a través de una membrana de intercambio iónico*. Educación Química. Vol. 30(4), 07-08.

-Venero, J. (2002). *Procesos de separación por electrodiálisis*. [tesis pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú].

-Medina, I. (2007). *Tratamiento de aguas de producción con electrodiálisis. [*Tesis de pregrado, Universidad de los Andes, Mérida. México].

-Medina, J. (2018). *Optimización de los parámetros de operación de un módulo de electrodiálisis metátesis para tratar concentrados de agua salobre procedentes de osmosis inversa*. [Informe de investigación, Universidad Nacional del Callao, Callao, Perú].

Anexos

Anexo 1: *Determinación de la conductividad del tanque de diluido en función del tiempo de operación:*

Tabla 24

Conductividad vs tiempo a las condiciones de operación conductividad 0.44 ms/cm, potencial 4 V y flujo 19.2 ml/ min.

Tiempo (min)	Potencial eléctrico (v)	Conductividad (mS/cm)	Intensidad de corriente (amp)	% D
0	4	0.44	0.02	0.00
2	4	0.43	0.01	2.27
4	4	0.43	0.01	2.27
6	4	0.41	0.01	6.82
8	4	0.41	0.01	6.82
10	4	0.41	0.01	6.82
12	4	0.4	0.01	9.09
14	4	0.39	0.01	11.36
16	4	0.38	0.01	13.64
18	4	0.37	0.01	15.91
20	4	0.36	0.01	18.18
22	4	0.35	0.01	20.45
24	4	0.35	0.01	20.45
26	4	0.34	0.01	22.73
28	4	0.34	0.01	22.73
30	4	0.33	0.01	25.00
32	4	0.33	0.01	25.00
34	4	0.32	0.01	27.27
36	4	0.32	0.01	27.27
40	4	0.31	0.01	29.55
44	4	0.3	0.01	31.82
48	4	0.29	0.01	34.09
52	4	0.27	0.01	38.64
56	4	0.26	0.01	40.91
60	4	0.25	0.01	43.18
64	4	0.24	0.00	45.45
68	4	0.23	0.00	47.73
72	4	0.22	0.00	50.00
76	4	0.21	0.00	52.27
80	4	0.2	0.00	54.55

84	4	0.19	0.00	56.82
88	4	0.18	0.00	59.09
92	4	0.17	0.00	61.36
96	4	0.17	0.00	61.36
100	4	0.16	0.00	63.64
104	4	0.16	0.00	63.64
108	4	0.15	0.00	65.91
112	4	0.15	0.00	65.91
116	4	0.14	0.00	68.18
120	4	0.14	0.00	68.18
125	4	0.13	0.00	70.45

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 25

Conductividad vs tiempo a las condiciones de operación de conductividad 0.44 ms/cm, potencial 8 V y flujo 26.4 ml/ min.

Tiempo (min)	Potencial eléctrico (v)	Conductividad (mS/cm)	Intensidad de corriente (amp)	% D
0	8	0.44	0.08	0.00
2	8	0.44	0.06	0.00
4	8	0.43	0.06	2.27
6	8	0.41	0.05	6.82
8	8	0.39	0.05	11.36
10	8	0.37	0.04	15.91
12	8	0.35	0.04	20.45
14	8	0.34	0.04	22.73
16	8	0.32	0.04	27.27
18	8	0.3	0.04	31.82
20	8	0.28	0.04	36.36
22	8	0.26	0.04	40.91
24	8	0.25	0.04	43.18
26	8	0.24	0.04	45.45
28	8	0.23	0.04	47.73
30	8	0.21	0.03	52.27
32	8	0.2	0.03	54.55
34	8	0.19	0.03	56.82
36	8	0.18	0.03	59.09
40	8	0.15	0.02	65.91
44	8	0.14	0.02	68.18
48	8	0.12	0.02	72.73

52	8	0.11	0.01	75.00
56	8	0.1	0.01	77.27
60	8	0.09	0.01	79.55
64	8	0.09	0.01	79.55
68	8	0.08	0.01	81.82
72	8	0.08	0.01	81.82
76	8	0.08	0.00	81.82
80	8	0.07	0.00	84.09
84	8	0.07	0.00	84.09
88	8	0.07	0.00	84.09
92	8	0.06	0.00	86.36
96	8	0.05	0.00	88.64
100	8	0.05	0.00	88.64
104	8	0.04	0.00	90.91
108	8	0.04	0.00	90.91
112	8	0.03	0.00	93.18
116	8	0.03	0.00	93.18
120	8	0.02	0.00	95.45
125	8	0.02	0.00	95.45

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 26

Conductividad vs tiempo a las condiciones de operación de conductividad 0.44 ms/cm, potencial 12 V y flujo 31.2 ml/ min.

Tiempo (min)	Potencial eléctrico (v)	Conductividad (mS/cm)	Intensidad de corriente (amp)	% D
0	12	0.44	0.08	0.00
2	12	0.42	0.06	4.55
4	12	0.40	0.06	9.09
6	12	0.37	0.05	15.91
8	12	0.34	0.05	22.73
10	12	0.30	0.04	31.82
12	12	0.27	0.04	38.64
14	12	0.25	0.04	43.18
16	12	0.24	0.04	45.45
18	12	0.24	0.04	45.45
20	12	0.23	0.04	47.73
22	12	0.23	0.04	47.73
24	12	0.22	0.04	50.00
26	12	0.22	0.04	50.00

28	12	0.21	0.04	52.27
30	12	0.21	0.03	52.27
32	12	0.2	0.03	54.55
34	12	0.19	0.03	56.82
36	12	0.18	0.03	59.09
40	12	0.17	0.02	61.36
44	12	0.15	0.02	65.91
48	12	0.11	0.02	75.00
52	12	0.09	0.01	79.55
56	12	0.08	0.01	81.82
60	12	0.06	0.01	86.36
64	12	0.05	0.01	88.64
68	12	0.04	0.01	90.91
72	12	0.02	0.01	95.45
76	12	0.02	0.00	95.45
80	12	0.02	0.00	95.45
84	12	0.02	0.00	95.45
88	12	0.02	0.00	95.45
92	12	0.02	0.00	95.45
96	12	0.01	0.00	97.73
100	12	0.01	0.00	97.73
104	12	0.01	0.00	97.73
108	12	0.0023	0.00	99.48
112	12	0.0023	0.00	99.48
116	12	0.0023	0.00	99.48
120	12	0.0023	0.00	99.48
125	12	0.0023	0.00	99.48

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 27

Conductividad vs tiempo a las condiciones de operación de conductividad 0.55 ms/cm, potencial 4V y flujo 26.4 ml/ min.

Tiempo (min)	Potencial eléctrico (v)	Conductividad (mS/cm)	Intensidad de corriente (amp)	% D
0	4	0.55	0.02	0.00
2	4	0.54	0.01	1.82
4	4	0.53	0.01	3.64
6	4	0.53	0.01	3.64
8	4	0.52	0.01	5.45
10	4	0.51	0.01	7.27

12	4	0.51	0.01	7.27
14	4	0.50	0.01	9.09
16	4	0.49	0.01	10.91
18	4	0.48	0.01	12.73
20	4	0.48	0.01	12.73
22	4	0.47	0.01	14.55
24	4	0.46	0.01	16.36
26	4	0.45	0.01	18.18
28	4	0.44	0.01	20.00
30	4	0.43	0.01	21.82
32	4	0.42	0.01	23.64
34	4	0.42	0.01	23.64
36	4	0.41	0.01	25.45
40	4	0.38	0.01	30.91
46	4	0.36	0.01	34.55
50	4	0.35	0.01	36.36
54	4	0.34	0.01	38.18
58	4	0.32	0.01	41.82
60	4	0.31	0.01	43.64
64	4	0.30	0.01	45.45
68	4	0.28	0.01	49.09
72	4	0.27	0.01	50.91
76	4	0.26	0.01	52.73
80	4	0.24	0.01	56.36
84	4	0.23	0.01	58.18
88	4	0.22	0.01	60.00
92	4	0.21	0.01	61.82
96	4	0.20	0.01	63.64
100	4	0.19	0.00	65.45
104	4	0.18	0.00	67.27
108	4	0.17	0.00	69.09
112	4	0.16	0.00	70.91
116	4	0.15	0.00	72.73
120	4	0.14	0.00	74.55
125	4	0.13	0.00	76.36

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 28

Conductividad vs tiempo a las condiciones de operación de conductividad 0.55 ms/cm, potencial 8V y flujo 31.2 ml/ min.

Tiempo (min)	Potencial eléctrico (v)	Conductividad (mS/cm)	Intensidad de corriente (amp)	% D
0	8	0.55	0.07	0.00
2	8	0.54	0.04	1.82
4	8	0.53	0.04	3.64
6	8	0.43	0.04	21.82
8	8	0.43	0.03	21.82
10	8	0.42	0.03	23.64
12	8	0.38	0.03	30.91
14	8	0.36	0.03	34.55
16	8	0.34	0.03	38.18
18	8	0.31	0.03	43.64
20	8	0.28	0.03	49.09
22	8	0.26	0.02	52.73
24	8	0.25	0.02	54.55
26	8	0.24	0.02	56.36
28	8	0.21	0.02	61.82
30	8	0.2	0.02	63.64
32	8	0.19	0.02	65.45
34	8	0.17	0.01	69.09
36	8	0.15	0.01	72.73
40	8	0.14	0.01	74.55
44	8	0.11	0.01	80.00
48	8	0.09	0.01	83.64
52	8	0.08	0.01	85.45
56	8	0.07	0.01	87.27
60	8	0.06	0.01	89.09
64	8	0.06	0.01	89.09
68	8	0.06	0.01	89.09
72	8	0.05	0.01	90.91
76	8	0.05	0.01	90.91
80	8	0.04	0.01	92.73
84	8	0.04	0.00	92.73
88	8	0.03	0.00	94.55
92	8	0.03	0.00	94.55
96	8	0.03	0.00	94.55
100	8	0.02	0.00	96.36
104	8	0.02	0.00	96.36

108	8	0.01	0.00	98.18
112	8	0.01	0.00	98.18
116	8	0.01	0.00	98.18
120	8	0.01	0.00	98.18
125	8	0.0048	0.00	99.13

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 29

Conductividad vs tiempo a las condiciones de operación Conductividad 0.55 ms/cm, potencial 12V y flujo 19.2 ml/ min.

Tiempo (min)	Potencial eléctrico (v)	Conductividad (mS/cm)	Intensidad de corriente (amp)	% D
0	12	0.55	0.1	0.00
2	12	0.53	0.09	3.64
4	12	0.50	0.06	9.09
6	12	0.47	0.05	14.55
8	12	0.43	0.05	21.82
10	12	0.39	0.05	29.09
12	12	0.35	0.05	36.36
14	12	0.33	0.05	40.00
16	12	0.30	0.04	45.45
18	12	0.28	0.04	49.09
20	12	0.26	0.04	52.73
22	12	0.25	0.04	54.55
24	12	0.24	0.04	56.36
26	12	0.24	0.04	56.36
28	12	0.24	0.04	56.36
30	12	0.24	0.04	56.36
32	12	0.23	0.04	58.18
34	12	0.23	0.03	58.18
36	12	0.23	0.03	58.18
40	12	0.22	0.03	60.00
44	12	0.2	0.03	63.64
48	12	0.19	0.03	65.45
52	12	0.18	0.02	67.27
56	12	0.16	0.02	70.91
60	12	0.15	0.02	72.73
64	12	0.13	0.02	76.36
68	12	0.11	0.01	80.00
72	12	0.1	0.01	81.82

76	12	0.09	0.01	83.64
80	12	0.08	0.01	85.45
84	12	0.07	0.01	87.27
88	12	0.06	0.01	89.09
92	12	0.05	0.01	90.91
96	12	0.04	0.01	92.73
100	12	0.04	0.01	92.73
104	12	0.03	0.00	94.55
108	12	0.02	0.00	96.36
112	12	0.02	0.00	96.36
116	12	0.01	0.00	98.18
120	12	0.01	0.00	98.18
125	12	0.01	0.00	98.18

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 30

Conductividad vs tiempo a las condiciones de operación Conductividad 1.28 ms/cm, potencial 4 V y flujo 31.2 ml/ min.

Tiempo (min)	Potencial eléctrico (v)	Conductividad (mS/cm)	Intensidad de corriente (amp)	% D
0	4	1.28	0.04	0.00
2	4	1.26	0.03	1.56
4	4	1.23	0.03	3.91
6	4	1.21	0.03	5.47
8	4	1.20	0.03	6.25
10	4	1.18	0.03	7.81
12	4	1.15	0.03	10.16
14	4	1.13	0.03	11.72
16	4	1.12	0.03	12.50
18	4	1.09	0.03	14.84
20	4	1.08	0.03	15.63
22	4	1.07	0.02	16.41
24	4	1.06	0.02	17.19
26	4	1.04	0.02	18.75
28	4	1.03	0.02	19.53
30	4	1.02	0.02	20.31
32	4	1.01	0.02	21.09
34	4	1.00	0.02	21.88
36	4	0.96	0.02	25.00
40	4	0.94	0.02	26.56
44	4	0.92	0.02	28.13
48	4	0.88	0.02	31.25

52	4	0.85	0.02	33.59
56	4	0.82	0.02	35.94
60	4	0.80	0.02	37.50
64	4	0.77	0.02	39.84
68	4	0.76	0.02	40.63
72	4	0.73	0.02	42.97
76	4	0.71	0.02	44.53
80	4	0.69	0.02	46.09
84	4	0.65	0.02	49.22
88	4	0.62	0.02	51.56
92	4	0.59	0.02	53.91
96	4	0.56	0.02	56.25
100	4	0.53	0.02	58.59
104	4	0.50	0.01	60.94
108	4	0.47	0.01	63.28
112	4	0.43	0.01	66.41
116	4	0.40	0.01	68.75
120	4	0.37	0.01	71.09
125	4	0.34	0.01	73.44

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 31

Conductividad vs tiempo a las condiciones de operación conductividad 1.28 ms/cm, potencial 8 V y flujo 19.2 ml/ min.

Tiempo (min)	Potencial eléctrico (v)	Conductividad (mS/cm)	Intensidad de corriente (amp)	% D
0	8	1.28	0.13	0.00
2	8	1.23	0.06	3.91
4	8	1.21	0.05	5.47
6	8	1.19	0.05	7.03
8	8	1.18	0.05	7.81
10	8	1.17	0.05	8.59
12	8	1.14	0.04	10.94
14	8	1.08	0.04	15.63
16	8	1.06	0.04	17.19
18	8	1.04	0.04	18.75
20	8	1.01	0.04	21.09
22	8	0.99	0.04	22.66
24	8	0.97	0.04	24.22
26	8	0.95	0.04	25.78
28	8	0.93	0.04	27.34
30	8	0.90	0.04	29.69

32	8	0.89	0.04	30.47
34	8	0.87	0.03	32.03
36	8	0.84	0.03	34.38
40	8	0.81	0.03	36.72
44	8	0.78	0.03	39.06
48	8	0.74	0.03	42.19
52	8	0.70	0.03	45.31
56	8	0.68	0.03	46.88
60	8	0.65	0.03	49.22
64	8	0.63	0.03	50.78
68	8	0.59	0.03	53.91
72	8	0.57	0.03	55.47
76	8	0.55	0.02	57.03
80	8	0.51	0.02	60.16
84	8	0.48	0.02	62.50
88	8	0.45	0.02	64.84
92	8	0.44	0.02	65.63
96	8	0.42	0.02	67.19
100	8	0.40	0.02	68.75
104	8	0.38	0.02	70.31
108	8	0.35	0.02	72.66
112	8	0.33	0.01	74.22
116	8	0.30	0.01	76.56
120	8	0.24	0.01	81.25
125	8	0.22	0.01	82.81

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 32

Conductividad vs tiempo a las condiciones de operación Conductividad 1.28 ms/cm, potencial 12 V y flujo 26.4 ml/ min.

Tiempo (min)	Potencial eléctrico (v)	Conductividad (mS/cm)	Intensidad de corriente (amp)	% D
0	12	1.28	0.19	0.00
2	12	1.24	0.14	3.13
4	12	1.16	0.13	9.38
6	12	1.06	0.13	17.19
8	12	1.01	0.13	21.09
10	12	0.98	0.13	23.44
12	12	0.96	0.12	25.00
14	12	0.93	0.12	27.34
16	12	0.91	0.12	28.91
18	12	0.9	0.12	29.69

20	12	0.88	0.12	31.25
22	12	0.86	0.12	32.81
24	12	0.83	0.11	35.16
26	12	0.8	0.11	37.50
28	12	0.77	0.11	39.84
30	12	0.76	0.10	40.63
32	12	0.75	0.10	41.41
34	12	0.74	0.09	42.19
36	12	0.74	0.08	42.19
40	12	0.69	0.08	46.09
44	12	0.62	0.07	51.56
48	12	0.55	0.07	57.03
52	12	0.50	0.07	60.94
56	12	0.47	0.06	63.28
60	12	0.42	0.06	67.19
64	12	0.36	0.05	71.88
68	12	0.31	0.05	75.78
72	12	0.26	0.04	79.69
76	12	0.24	0.04	81.25
80	12	0.22	0.03	82.81
84	12	0.19	0.03	85.16
88	12	0.17	0.03	86.72
92	12	0.15	0.02	88.28
96	12	0.12	0.02	90.63
100	12	0.09	0.02	92.97
104	12	0.08	0.01	93.75
108	12	0.07	0.01	94.53
112	12	0.07	0.01	94.53
116	12	0.06	0.01	95.31
120	12	0.04	0.01	96.88
125	12	0.0319	0.01	97.51

Fuente: Elaboración Propia.

Anexo 2: *Informe de análisis fisicoquímico de agua subterránea*

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

Nº DE REPORTE:	**22640-21**
CLIENTE:	SONIA MAMANI HUAMANI ROLANDO ZARATE ZANALEA
DIRECCIÓN:	AREQUIPA
ENSAYO SOLICITADO:	ANÁLISIS FISICO QUIMICO ANÁLISIS POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X
PRODUCTO	AGUA
CANTIDAD DE MUESTRA	01
FECHA DE RECEPCION:	Lunes, 28 de junio de 2021.
CARACTERISTICAS Y CONDICIONES:	BOTELLA DE PLASTICO
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS:	Viernes, 16 de julio de 2021.
REFERENCIA	MUESTRA PROPORCIONADA POR EL CLIENTE
PROCEDENCIA:	**AGUA SUBSUELO PARQUE INDUSTRIAL – PLANTA CIDASA S.A.**
CÓDIGO DE MUESTRA	28835

LOS RESULTADOS OBTENIDOS CORRESPONDEN AL ANÁLISIS SOLICITADO EN LA MUESTRA RECIBIDA.
ESTE FORMATO NO SERÁ REPRODUCIDO SIN AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO LABINVSERV

Página 1 de 3

Av. Independencia s/n Arequipa - Pabellón de Química - Laboratorio 108 - Primer Piso
Teléfono (054) 220360 / E-mail: fonf_labinvserv@unsa.edu.pe

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

REPORTE N°: 22640-21

ANÁLISIS DE:	UNIDAD	RESULTADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO NORMA/REFERENCIA/NOMBRE
pH	-	7.14	Método AOAC
Conductividad	µS/cm	604.00	Método de la AOAC
Cloruros	mg/L	65.02	Método Mercurimétrico (1, 2) 33.067 de la AOAC
Sulfatos	mg/L	90.40	Método Turbidimétrico (1, 2) de la AOAC
Alcalinidad Total	mg/L $CaCO_3$	117.85	Método Volumétrico
Dureza Total	mg/L	191.69	Método Gravimétrico
OBSERVACIONES:			

Emitido en Arequipa, el 16 de junio de 2021.

Dr. Juan Reyes Larico
Jefe de Laboratorio
RCQP – 348

Anal. Qm. Ruth Begazo Guillén
Químico Responsable

Av. Independencia s/n Arequipa - Pabellón de Química - Laboratorio 108 - Primer Piso
Teléfono (054) 220360 / E-mail: fcnf_labinvserv@unsa.edu.pe

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

REPORTE N°: 22640-21

Concentración de muestra: Puzolana

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (ppm)
S	153
Cl	145
Ni	94.6
Si	(58.7)
Cu	52.2
Cd	31.1
Zn	25.4

Emitido en Arequipa, 16 de junio de 2021.

Dr. Juan Reyes Larico
Jefe de Laboratorio
RCQP – 348

Anal. Qm. Ruth Begazo Guillén
Quimico Responsable

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

N° DE REPORTE:	**22641-21**
CLIENTE:	SONIA MAMANI HUAMANI ROLANDO ZARATE ZANALEA
DIRECCIÓN:	AREQUIPA
ENSAYO SOLICITADO:	ANÁLISIS FISICO QUIMICO ANÁLISIS POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X
PRODUCTO	AGUA
CANTIDAD DE MUESTRA	01
FECHA DE RECEPCION:	Martes, 06 de julio de 2021.
CARACTERISTICAS Y CONDICIONES:	BOTELLA DE PLASTICO
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS:	Viernes, 16 de julio de 2021.
REFERENCIA	MUESTRA PROPORCIONADA POR EL CLIENTE
PROCEDENCIA:	**AGUA SUBSUELO PACHACUTEC.**
CÓDIGO DE MUESTRA	28843

LOS RESULTADOS OBTENIDOS CORRESPONDEN AL ANÁLISIS SOLICITADO EN LA MUESTRA RECIBIDA.
ESTE FORMATO NO SERÁ REPRODUCIDO SIN AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO LABINVSERV

Av. Independencia s/n Arequipa - Pabellón de Química - Laboratorio 108 - Primer Piso
Teléfono (054) 220360 / E-mail: fcnf_labinvserv@unsa.edu.pe

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

REPORTE N°: 22641-21

ANÁLISIS DE:	UNIDAD	RESULTADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO NORMA/REFERENCIA/NOMBRE
pH	-	7.72	Método AOAC
Conductividad	µS/cm	1424.00	Método de la AOAC
Cloruros	mg/L	166.37	Método Mercurimétrico (1, 2) 33.067 de la AOAC
Sulfatos	mg/L	484.00	Método Turbidimétrico (1, 2) de la AOAC
Alcalinidad Total	mg/L $CaCO_3$	94.28	Método Volumétrico
Dureza Total	mg/L	318.58	Método Gravimétrico
OBSERVACIONES:			

Emitido en Arequipa, el 16 de junio de 2021.

Dr. Juan Reyes Larico
Jefe de Laboratorio
RCQP – 348

Anal. Qm. Ruth Begazo Guillén
Químico Responsable

Av. Independencia s/n Arequipa - Pabellón de Química - Laboratorio 108 - Primer Piso
Teléfono (054) 220360 / E-mail: fcnf_labinvserv@unsa.edu.pe

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

REPORTE N°: 22641-21

Concentración de muestra: Puzolana

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (ppm)
Si	491
S	338
Cl	258
Cr	123
Ni	96.5
Fe	65.1
Cu	52.2
Cd	29.4
Zn	25.0

Emitido en Arequipa, 16 de junio de 2021.

Dr. Juan Reyes Larico
Jefe de Laboratorio
RCQP – 348

Anal. Qm. Ruth Begazo Guillén
Químico Responsable

Av. Independencia s/n Arequipa - Pabellón de Química - Laboratorio 108 - Primer Piso
Teléfono (054) 220360 / E-mail: fcnf_labinvserv@unsa.edu.pe

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

N° DE REPORTE:	**22642-21**
CLIENTE:	SONIA MAMANI HUAMANI ROLANDO ZARATE ZANALEA
DIRECCIÓN:	AREQUIPA
ENSAYO SOLICITADO:	ANÁLISIS FISICO QUIMICO ANÁLISIS POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X
PRODUCTO	AGUA
CANTIDAD DE MUESTRA	01
FECHA DE RECEPCION:	Martes, 06 de julio de 2021.
CARACTERISTICAS Y CONDICIONES:	BOTELLA DE PLASTICO
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS:	Viernes, 16 de julio de 2021.
REFERENCIA	MUESTRA PROPORCIONADA POR EL CLIENTE
PROCEDENCIA:	**AGUA SUBSUELO CHARACATO.**
CÓDIGO DE MUESTRA	28844

LOS RESULTADOS OBTENIDOS CORRESPONDEN AL ANÁLISIS SOLICITADO EN LA MUESTRA RECIBIDA.
ESTE FORMATO NO SERÁ REPRODUCIDO SIN AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO LABINVSERV

Av. Independencia s/n Arequipa - Pabellón de Química - Laboratorio 108 - Primer Piso
Teléfono (054) 220360 / E-mail: fcnf_labinvserv@unsa.edu.pe

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

REPORTE N°: 22642-21

ANÁLISIS DE:	UNIDAD	RESULTADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO NORMA/REFERENCIA/NOMBRE
pH	-	7.41	Método AOAC
Conductividad	µS/cm	506.00	Método de la AOAC
Cloruros	mg/L	45.72	Método Mercurimétrico (1, 2) 33.067 de la AOAC
Sulfatos	mg/L	106.00	Método Turbidimétrico (1, 2) de la AOAC
Alcalinidad Total	mg/L $CaCO_3$	80.13	Método Volumétrico
Dureza Total	mg/L	185.15	Método Gravimétrico
OBSERVACIONES:			

Emitido en Arequipa, el 16 de junio de 2021.

Dr. Juan Reyes Larico
Jefe de Laboratorio
RCQP – 348

Anal. Qm. Ruth Begazo Guillén
Quimico Responsable

Av. Independencia s/n Arequipa - Pabellón de Química - Laboratorio 108 - Primer Piso
Teléfono (054) 220360 / E-mail: fcnf_labinvserv@unsa.edu.pe

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

REPORTE N°: 22642-21

Concentración de muestra: Puzolana

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (ppm)
S	213
Cl	182
Si	136
Ni	99.7
P	54.7
Cu	50.4
Cd	31.6
Zn	26.5
Pd	10.8
Sn	(7.31)

Emitido en Arequipa, 16 de junio de 2021.

Dr. Juan Reyes Larico
Jefe de Laboratorio
RCQP – 348

Anal. Qm. Ruth Begazo Guillén
Químico Responsable

Av. Independencia s/n Arequipa - Pabellón de Química - Laboratorio 108 - Primer Piso
Teléfono (054) 220360 / E-mail: fcnf_labinvserv@unsa.edu.pe

Anexo 3: *Informe de análisis fisicoquímicos de agua subterránea tratada por electrodiálisis*

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

N° DE REPORTE:	**22643-21**
CLIENTE:	SONIA MAMANI HUAMANI ROLANDO ZARATE ZANALEA
DIRECCIÓN:	AREQUIPA
ENSAYO SOLICITADO:	ANÁLISIS FISICO QUIMICO ANÁLISIS POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X
PRODUCTO	AGUA
CANTIDAD DE MUESTRA	01
FECHA DE RECEPCION:	Martes, 06 de julio de 2021.
CARACTERISTICAS Y CONDICIONES:	BOTELLA DE PLASTICO
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS:	Viernes, 16 de julio de 2021.
REFERENCIA	MUESTRA PROPORCIONADA POR EL CLIENTE
PROCEDENCIA:	**AGUA DE SUBSUELO TRATADA POR ELECTRODIALISIS – PARQUE INDUSTRIAL.**
CÓDIGO DE MUESTRA	28845

LOS RESULTADOS OBTENIDOS CORRESPONDEN AL ANÁLISIS SOLICITADO EN LA MUESTRA RECIBIDA.
ESTE FORMATO NO SERÁ REPRODUCIDO SIN AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO LABINVSERV

Página 1 de 3

Av. Independencia s/n Arequipa - Pabellón de Química - Laboratorio 108 - Primer Piso
Teléfono (054) 220360 / E-mail: fcnf_labinvserv@unsa.edu.pe

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

REPORTE N°: 22643-21

ANÁLISIS DE:	UNIDAD	RESULTADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO NORMA/REFERENCIA/NOMBRE
pH	-	6.26	Método AOAC
Conductividad	µS/cm	4.80	Método de la AOAC
Cloruros	mg/L	0.50	Método Mercurimétrico (1, 2) 33.067 de la AOAC
Sulfatos	mg/L	0.00	Método Turbidimétrico (1, 2) de la AOAC
Alcalinidad Total	mg/L $CaCO_3$	1.95	Método Volumétrico
Dureza Total	mg/L	2.17	Método Gravimétrico
OBSERVACIONES:			

Emitido en Arequipa, el 16 de junio de 2021.

Dr. Juan Reyes Larico
Jefe de Laboratorio
RCQP – 348

Anal. Qm. Ruth Begazo Guillén
Químico Responsable

Av. Independencia s/n Arequipa - Pabellón de Química - Laboratorio 108 - Primer Piso
Teléfono (054) 220360 / E-mail: fcnf_labinvserv@unsa.edu.pe

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

REPORTE N°: 22643-21

Concentración de muestra: Puzolana

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (ppm)
S	187
Cl	139
Si	122
Ni	93.8
P	56.4
Cu	50.6
Cd	30.6
Zn	26.1

Emitido en Arequipa, 16 de junio de 2021.

Dr. Juan Reyes Larico
Jefe de Laboratorio
RCQP – 348

Anal. Qm. Ruth Begazo Guillén
Químico Responsable

Av. Independencia s/n Arequipa - Pabellón de Química - Laboratorio 108 - Primer Piso
Teléfono (054) 220360 / E-mail: fcnf_labinvserv@unsa.edu.pe

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

N° DE REPORTE:	**22657-21**
CLIENTE:	SONIA MAMANI HUAMANI ROLANDO ZARATE ZANALEA
DIRECCIÓN:	AREQUIPA
ENSAYO SOLICITADO:	ANÁLISIS FISICO QUIMICO ANÁLISIS POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X
PRODUCTO	AGUA
CANTIDAD DE MUESTRA	01
FECHA DE RECEPCION:	Lunes, 12 de julio de 2021.
CARACTERISTICAS Y CONDICIONES:	BOTELLA DE PLASTICO
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS:	Viernes, 16 de julio de 2021.
REFERENCIA	MUESTRA PROPORCIONADA POR EL CLIENTE
PROCEDENCIA:	**AGUA DE SUBSUELO TRATADA POR ELECTRODIALISIS – PACHACUTEC.**
CÓDIGO DE MUESTRA	28848

LOS RESULTADOS OBTENIDOS CORRESPONDEN AL ANÁLISIS SOLICITADO EN LA MUESTRA RECIBIDA.
ESTE FORMATO NO SERÁ REPRODUCIDO SIN AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO LABINVSERV

Av. Independencia s/n Arequipa - Pabellón de Química - Laboratorio 108 - Primer Piso
Teléfono (054) 220360 / E-mail: fonf_labinvserv@unsa.edu.pe

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

REPORTE N°: 22657-21

ANÁLISIS DE:	UNIDAD	RESULTADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO NORMA/REFERENCIA/NOMBRE
pH	-	5.88	Método AOAC
Conductividad	µS/cm	31.90	Método de la AOAC
Cloruros	mg/L	3.55	Método Mercurimétrico (1, 2) 33.067 de la AOAC
Alcalinidad Total	mg/L $CaCO_3$	1.17	Método Volumétrico
Dureza Total	mg/L	2.17	Método Gravimétrico
OBSERVACIONES:			

Emitido en Arequipa, el 16 de junio de 2021.

Dr. Juan Reyes Larico
Jefe de Laboratorio
RCQP – 348

Anal. Qm. Ruth Begazo Guillén
Químico Responsable

Av. Independencia s/n Arequipa - Pabellón de Química - Laboratorio 108 - Primer Piso
Teléfono (054) 220360 / E-mail: fcnf_labinvserv@unsa.edu.pe

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

REPORTE N°: 22657-21

Concentración de muestra: Agua tratada

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (ppm)
S	187
Si	183
Cl	133
Ni	98.7
Cu	53.8
P	(47.2)
Cd	31.9
Zn	25.7
Sn	(7.02)

Emitido en Arequipa, 16 de junio de 2021.

Dr. Juan Reyes Larico
Jefe de Laboratorio
RCQP – 348

Anal. Qm. Ruth Begazo Guillén
Químico Responsable

Av. Independencia s/n Arequipa - Pabellón de Química - Laboratorio 108 - Primer Piso
Teléfono (054) 220360 / E-mail: fcnf_labinvserv@unsa.edu.pe

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

N° DE REPORTE:	**22656-21**
CLIENTE:	SONIA MAMANI HUAMANI ROLANDO ZARATE ZANALEA
DIRECCIÓN:	AREQUIPA
ENSAYO SOLICITADO:	ANÁLISIS FISICO QUIMICO ANÁLISIS POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X
PRODUCTO	AGUA
CANTIDAD DE MUESTRA	01
FECHA DE RECEPCION:	Lunes, 12 de julio de 2021.
CARACTERISTICAS Y CONDICIONES:	BOTELLA DE PLASTICO
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS:	Viernes, 16 de julio de 2021.
REFERENCIA	MUESTRA PROPORCIONADA POR EL CLIENTE
PROCEDENCIA:	**AGUA DE SUBSUELO TRATADA POR ELECTRODIALISIS – CHARACATO.**
CÓDIGO DE MUESTRA	28847

LOS RESULTADOS OBTENIDOS CORRESPONDEN AL ANÁLISIS SOLICITADO EN LA MUESTRA RECIBIDA.
ESTE FORMATO NO SERÁ REPRODUCIDO SIN AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO LABINVSERV

Av. Independencia s/n Arequipa - Pabellón de Química - Laboratorio 108 - Primer Piso
Teléfono (054) 220360 / E-mail: fcnf_labinvserv@unsa.edu.pe

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

REPORTE N°: 22656-21

ANÁLISIS DE:	UNIDAD	RESULTADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO NORMA/REFERENCIA/NOMBRE
pH	-	6.48	Método AOAC
Conductividad	µS/cm	2.30	Método de la AOAC
Cloruros	mg/L	1.01	Método Mercurimétrico (1, 2) 33.067 de la AOAC
Alcalinidad Total	mg/L $CaCO_3$	0.58	Método Volumétrico
Dureza Total	mg/L	0.54	Método Gravimétrico
OBSERVACIONES:			

Emitido en Arequipa, el 16 de junio de 2021.

Dr. Juan Reyes Larico
Jefe de Laboratorio
RCQP – 348

Anal. Qm. Ruth Begazo Guillén
Químico Responsable

Av. Independencia s/n Arequipa - Pabellón de Química - Laboratorio 108 - Primer Piso
Teléfono (054) 220360 / E-mail: fcnf_labinvserv@unsa.edu.pe

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

REPORTE N°: 22656-21

Concentración de muestra: Agua tratada

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (ppm)
Si	133
S	119
Cl	99.3
Ni	98.0
Fe	60.9
Cu	50.4
Zn	26.5

Emitido en Arequipa, 16 de junio de 2021.

Dr. Juan Reyes Larico
Jefe de Laboratorio
RCQP – 348

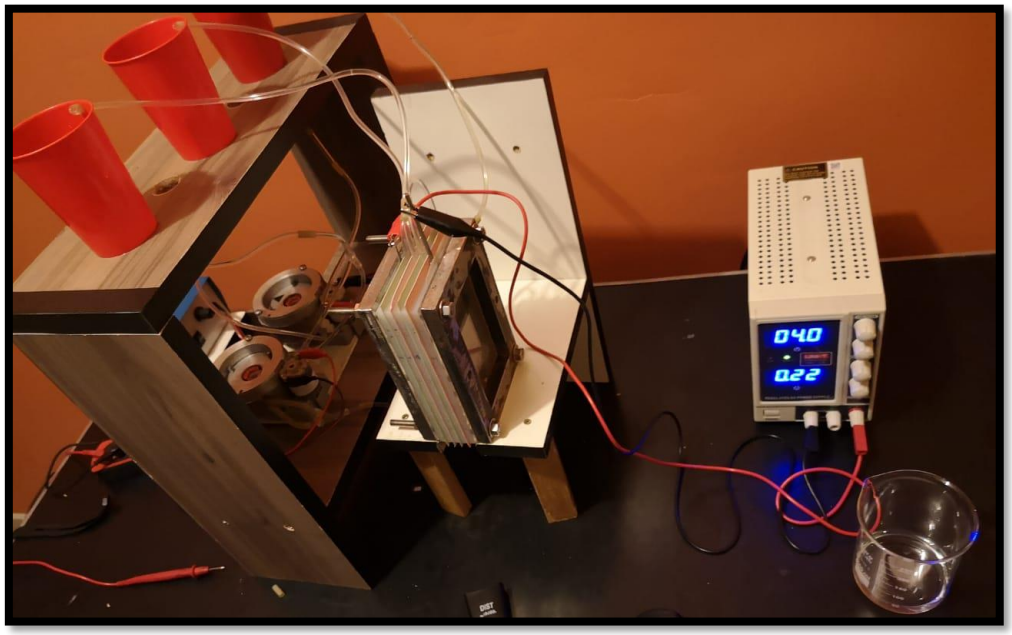
Anal. Qm. Ruth Begaze Guillén
Químico Responsable

Av. Independencia s/n Arequipa - Pabellón de Química - Laboratorio 108 - Primer Piso
Teléfono (054) 220360 / E-mail: fcnf_labinvserv@unsa.edu.pe

Anexo 4: *Imágenes de operación de equipo experimental a nivel laboratorio*

Figura 45

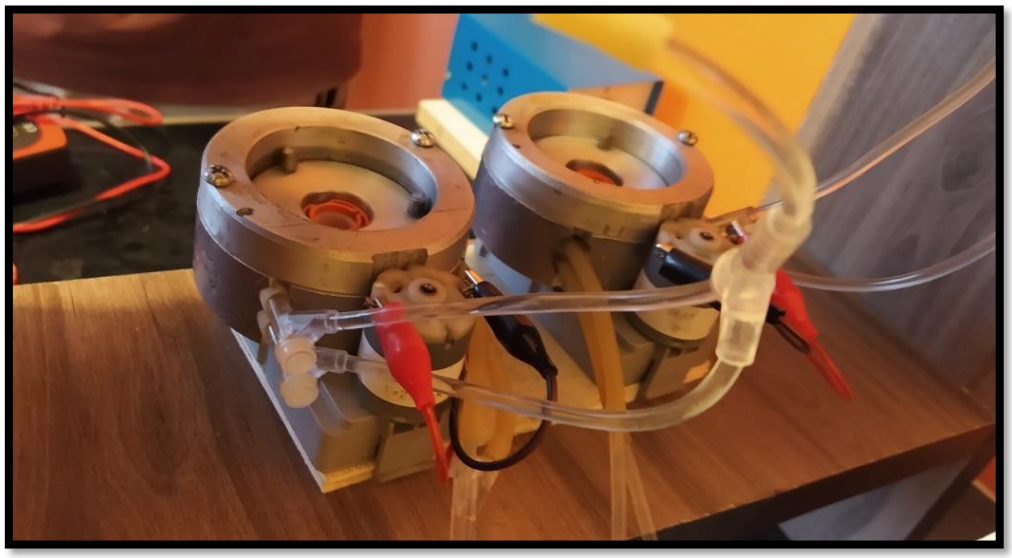
Módulo de electrodiálisis



Fuente: Elaboración propia

Figura 46

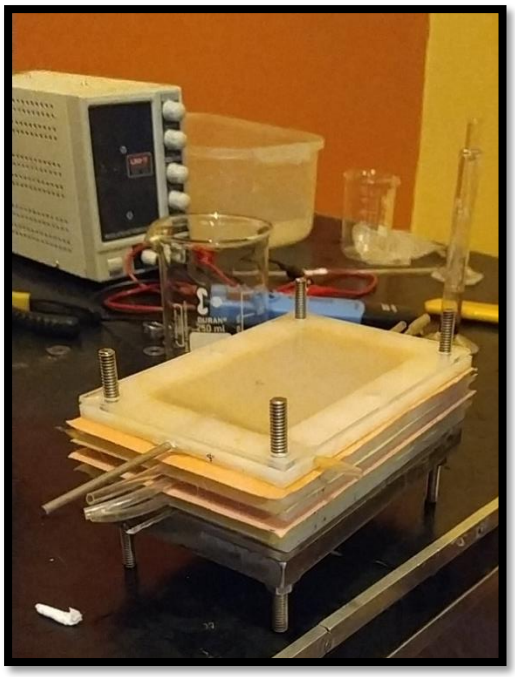
Ensamble de Bombas peristálticas



Fuente: Elaboración propia

Figura 47

Ensamble de celda de equipo experimental



Fuente: Elaboración propia

Figura 48

Medición de conductividad del agua producto.

Fuente: Elaboración propia