

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROYECTO DE GRADO
OBTENCIÓN DE AGUA ALCALINA IONIZADA A PARTIR DE
AGUA DE OSMOSIS INVERSA, MEDIANTE EL PROCESO DE LA
ELECTROLISIS
PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

POSTULANTE: Univ. Cristian Fernando Limachi Aruni

TUTOR: Msc. Ing. Boris Párraga Andrade

TRIBUNALES: Ing. Rene Gabriel Mejía Martínez

Ph.D. Ing. Rene Álvarez Apaza

La Paz – Bolivia

2023



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

DEDICATORIA

A mi padre Felipe Limachi, quien me motivo a superarme desde niño en los estudios, apoyándome sin importar los obstáculos que se le podría presentar, por su apoyo, mi título profesional se lo dedico por luchar y sacrificarse por su familia.

A mi madre Adela Aruni, por darme todo su amor y cariño desde niño, por ser la mejor mamá.

A mi esposa Irene Mamani, quien me apoyo en los momentos difíciles de mi vida, sin su apoyo me hubiese dado por vencido y renunciado a este sueño, ganándose todo mi amor y respeto.

A mis hermanos Paola, Mary, Marco, Richard y Deyvid mi inspiración para luchar, decirles que todo se puede sin importar los errores que se puedan cometer en el transcurso de la vida, por haber pasado hermosos e inolvidables momentos en nuestra infancia que quedará guardado en lo más profundo de mi corazón, siendo los más hermosos e inolvidables de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por guiar mis pasos, llenándome de sabiduría, encomendándome a ser una persona de bien.
A mi familia quienes me han apoyado y brindado su amor, pero sobre todo agradecer el esfuerzo que hicieron para que siga en mis estudios.

Al Ing. Boris Párraga Andrade por guiarme con sus sabios consejos, por su dedicación que ha mostrado en la enseñanza de sus conocimientos que marcaron una etapa de gran aprendizaje en mi vida universitaria y la culminación de este proyecto.

A mis tribunales de proyecto de grado Ing. Gabriel Mejía y Dr. Rene Álvarez por sus retroalimentaciones y mejorar la investigación del proyecto.

A la empresa Flor de Agua Unika S.R.L, al instituto de investigación de procesos químicos (IIDEPROQ - UMSA) y al Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales (IIMETMAT - UMSA) por prestarme sus laboratorios y realizar las pruebas establecidas en mi proyecto.

A mi hijo Santiago Limachi por ser una de mis grandes motivaciones de luchar en esta vida, sin importar lo mal que la vaya a pasar, gracias a su existencia tengo una razón más por el cual vivir, agradezco a dios por darme tan hermoso regalo.

A mis suegros Claudia Coronel y Gerardo Mamani, por brindarme su apoyo incondicional en uno de los momentos más difíciles de mi vida.

A mis sobrinos Brandon Herrera, Camila Limachi, Yandi y Emir, que los quiero mucho, además demostrándoles que los sueños y metas si se pueden lograr, con esfuerzo y sacrificio.

A mis amigos Franz, Miguel, Rene, Yerko, Limbert, por los buenos momentos que pasamos durante nuestras vidas, en el colegio y en la universidad, brindándome su valiosa amistad.

RESUMEN

El presente proyecto de grado estudia una alternativa para obtener agua alcalina ionizada utilizando como materia prima el agua de osmosis inversa comercializada como agua de mesa por empresas embotelladoras de agua, el cual con el consumo de esta se pretende dar beneficio a la salud de las personas, la obtención se realizó mediante el proceso de la electrolisis, realizando la producción en una celda electrolítica con el uso de la membrana de intercambio catiónico CMI-7000 y electrodos de titanio revestidos con platino, se obtuvo como producto un agua alcalina de $\text{pH} = 9,35$, $\text{ORP} = -95,8 \text{ mV}$ y enriquecida de minerales catiónicos. Se realizó el diseño y construcción de la celda tomando en cuenta criterios y consideraciones apropiadas para el proceso. Se realizó los estudios de diseño experimental de los efectos de las variables en la electrolisis, y así mismo el comportamiento cinético.

Palabras claves: pH, Agua de osmosis inversa, Electrolisis, ORP, Cationes, Cinética.

ABSTRACT

This degree project studies an alternative to obtain ionized alkaline water using reverse osmosis water marketed as a raw material by water bottling companies, which with the consumption of this is intended to benefit the health of people, obtaining was done through the process of electrolysis, Performing the production in an electrolytic cell with the use of cation exchange membrane CMI-7000 and titanium electrodes coated with platinum, was obtained as a product an alkaline water of pH = 9.35, ORP = -95.8 mV and enriched with cationic minerals. The design and construction of the cell was carried out taking into account criteria and considerations appropriate to the process. Experimental design studies of the effects of the variables on electrolysis, and likewise the kinetic behavior were carried out.

Key words: pH, Reverse osmosis water, Electrolysis, ORP, Cations, Kinetics.

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL.....	I
INDICE DE FIGURAS.....	VIII
INDICE DE TABLAS.....	X
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN AL PROYECTO.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	5
1.4.1. Justificación académica.....	5
1.4.2. Justificación económica.....	5
1.4.3. Justificación ambiental.....	5
1.5. ALCANCE Y LIMITACIONES.....	5
CAPITULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO.....	7
2.1. PROCESO DE OSMOSIS INVERSA.....	7
2.2. MEMBRANA.....	7
2.3. PROCESO DE PURIFICACIÓN DEL AGUA MEDIANTE LA OSMOSIS INVERSA, DE LA EMPRESA “FLOR DE AGUA UNIKA S.R.L.”.....	9
2.3.1. Proceso 1: Almacenamiento del agua a tratar.....	9
2.3.2. Proceso 2: Filtro de cartucho.....	9
2.3.3. Proceso 3: Columnas de intercambio iónico y de carbón activado.....	9
2.3.4. Proceso 4: Columna de carbón activado.....	11

2.3.5. Proceso 5: Almacenamiento del agua blanda en tanques.....	11
2.3.6. Proceso 6: Sistema de osmosis inversa.....	12
2.3.7. Proceso 7: Esterilizador ultravioleta para tratar el agua producida.....	13
2.3.8. Proceso 8: Tanque de almacenamiento de agua purificada.....	13
2.3.9. Control de calidad al agua.....	14
2.3.9.1. Parámetros químicos.....	14
2.3.9.2. Parámetros físicos.....	14
2.3.9.3. Parámetros microbiológicos.....	14
2.4. EL AGUA ALCALINA IONIZADA.....	15
2.4.1. Tipos de agua.....	15
2.4.1.1. Agua acida.....	15
2.4.1.2. Agua alcalina.....	15
2.4.2. Necesidad del consumo de agua alcalina para los humanos.....	15
2.4.3. Necesidad de antioxidantes.....	16
2.4.4. Peligros debidos al demasiado ácido.....	16
2.4.5. Ventajas del agua ionizada alcalina.....	16
2.5. MECANISMO DE FUNCIONAMIENTO DE UN IONIZADOR ALCALINO.....	17
2.5.1 Características Fisicoquímicas Del Agua Alcalina Ionizada.....	19
2.6. ASPECTOS GENERALES DEL PROCESO DE LA ELECTROLISIS.....	21
2.6.1. Electrolisis del agua para producción de H ₂	21
2.6.2. Potencial estándar y ecuación de Nernst.....	22
2.6.3. Consideraciones termodinámicas.....	23
2.6.4. Parámetros electroquímicos de la electrolisis.....	25

2.6.5. Consumo eléctrico.....	26
2.6.6. Uso de membranas en el proceso de la electrolisis.....	26
2.6.6.1. Membranas de intercambio catiónico.....	26
2.6.6.2. Membranas de intercambio aniónico.....	27
2.6.6.3. Uso Membrana CMI-7000 para el proceso del agua alcalina ionizada.....	28
2.6.7. Selección de la celda electrolítica.....	29
2.6.7.2 Celda electrolítica alcalina.....	30
2.6.7.3 Esquema de la celda electrolítica alcalina.....	30
2.6.7.4 Materias primas y reacciones químicas.....	31
2.7. VOLTAMPEROMETRÍA CÍCLICA.....	31
2.7.1. Voltametría Cíclica Y Técnicas De Barrido Lineal.....	31
2.7.2. Modelo De Randles – Sevcik para los parámetros de la voltametría cíclica.....	32
2.8. CINÉTICA ELECTROQUÍMICA.....	35
2.8.1. Modelo Butler - Volmer de cinética de electrodos.....	35
2.8.2. El coeficiente de transferencia.....	38
2.8.3. Corriente de intercambio.....	40
2.8.4. La ecuación corriente - sobre potencial.....	41
2.8.5. Comportamiento de Tafel en gran sobrepotencial.....	43
2.8.6. Gráficas de Tafel.....	44
2.9. TRANSPORTE DE MATERIA HACIA EL ELECTRODO.....	45
2.9.1. Formas de transporte de materia.....	45
2.9.2. Difusión para reacción química heterogénea.....	45
2.10. LEY DE LAS PRESIONES PARCIALES DE GASES.....	47
2.11. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	48

2.11.1. Diseño Factorial 2K.....	48
CAPITULO III: METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	50
3.1. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	50
3.1.1. Instrumentos.....	51
3.1.1.1. Materiales.....	51
3.1.1.2. Equipos.....	51
3.1.1.3. Reactivos.....	52
3.2. PROCESO DE PURIFICACION DEL AGUA.....	52
3.3. PROCESO DE OBTENCION DEL AGUA ALCALINA IONIZADA.....	55
3.3.1. Recepción de agua purificada.....	55
3.3.2. Caracterización de la materia prima.....	55
3.3.2.1. pH.....	55
3.3.2.2. Conductividad eléctrica.....	55
3.3.2.3. Dureza total.....	55
3.3.2.4. Solidos Totales Disueltos.....	56
3.3.2.5. Turbidez.....	56
3.3.2.6. Sodio.....	56
3.3.2.7. Potasio.....	56
3.3.2.8. Magnesio.....	56
3.3.2.9. Calcio.....	56
3.3.2.10. Cloruros.....	57
3.3.2.11. Bicarbonatos y alcalinidad.....	57
3.3.2.12. Coliformes totales.....	57
3.3.2.13. ORP.....	57

3.3.3. Diseño y Construcción de la celda electrolítica.....	58
3.3.4. Proceso de la electrolisis.....	63
3.3.5. Cinética electroquímica.....	65
3.3.6. Diseño experimental.....	67
CAPITULO IV: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	69
4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	69
4.2. CÁLCULOS DE LOS PARÁMETROS ELECTROQUÍMICOS INICIALES.....	71
4.3. DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS DURANTE LA OBTENCION DEL AGUA ALCALINA IONIZADA.....	72
4.4 DETERMINACION DE LA CINETICA ELECTROQUIMICA.....	74
4.4.1 Aplicación de la voltamperometría cíclica.....	74
4.4.2 Aplicación del modelo de Butler – Volmer y Tafel para la cinética electroquímica.....	78
4.5. DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO OBTENCIÓN DEL AGUA ALCALINA IONIZADA.....	82
4.5.1. Respuestas del diseño experimental.....	83
4.5.2. Resultados de Análisis ANOVA del diseño experimental.....	84
4.5.3. Análisis de los efectos principales y sus interacciones.....	85
4.5.4. Ecuación del modelo del diseño para el pH, ORP y Costo ajustado en función de los factores.....	90
4.5.5. Optimización de los resultados.....	90
4.6. RESULTADO DE LOS ANÁLISIS DEL AGUA ALCALINA IONIZADA PRODUCIDA EN EL LABORATORIO.....	94
4.7. RESULTADO DE LOS ANÁLISIS DEL AGUA ALCALINA IONIZADA “XYZ” PRODUCIDA POR UNA EMPRESA EN BOLIVIA.....	96
4.8. RESULTADO DE LOS ANÁLISIS DEL AGUA ACIDA PRODUCIDA.....	97

4.9. CURVAS EXPERIMENTALES DE CONCENTRACION DE CATIONES VS TIEMPO DURANTE LA PRODUCCIÓN DEL AGUA ALCALINA IONIZADA.....	97
4.10. DETERMINACION DE LA MASA PRODUCIDA DE H ₂ Y O ₂	99
4.11. BALANCE DE MATERIA HACIA EL ELECTRODO.....	100
4.12. ANALISIS DEL COSTO DE PRODUCCIÓN.....	105
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	108
5.1. CONCLUSIONES.....	108
5.2. RECOMENDACIONES.....	109
BIBLIOGRAFIA.....	110
ANEXOS.....	113
ANEXO A: CARACTERISTICAS TECNICAS DE LA MEMBRANA DE INTERCAMBIO CATIONICO CMI – 7000.....	113
ANEXO B: RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	115
ANEXO C: DISEÑO DE PLANOS Y MEDIDAS DE LA CELDA	116
ANEXO D: NORMA BOLIVIANA NB 512:2016 REQUISITOS AGUA POTABLE.....	118
ANEXO E: CÁLCULOS DE PARÁMETROS ELECTROQUÍMICOS INICIALES.....	119
ANEXO F: DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS DURANTE LA OBTENCIÓN DEL AGUA ALCALINA IONIZADA.....	121
ANEXO G: DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA OBTENCIÓN DE AGUA ALCALINA.....	124
ANEXO H: RESULTADOS DE ANÁLISIS DEL AGUA ALCALINA IONIZADA PRODUCIDA EN EL LABORATORIO.....	140
ANEXO I: RESULTADOS DE ANÁLISIS DEL AGUA ALCALINA IONIZADA COMERCIAL “XYZ”.....	141
ANEXO J: RESULTADOS DE ANÁLISIS DEL AGUA ACIDA PRODUCIDA EN EL LABORATORIO.....	142

ANEXO K: BARRIDOS DE POTENCIAL VS CORRIENTE.....	143
ANEXO L: CÁLCULOS AUXILIARES PARA LA ECUACIÓN DE TAFEL.....	145
ANEXO M: RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE CATIONES DEL AGUA ALCALINA IONIZADA DURANTE INTERVALOS DE TIEMPO.....	146
ANEXO N: ELECTRODO DE REFERENCIA SATURADO DE CALOMEL.....	151
ANEXO O: POTENCIOSTATO SERIES G 300 – GALVANOSTATO SERIES G 750.....	152
ANEXO P: ANALISIS DE DIFRACCION DE RAYOS X AL ELECTRODO DE TITANIO.....	153

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Osmosis inversa.....	7
Figura 2.2 Elementos de la membrana de osmosis inversa.....	8
Figura 2.3 Membrana usada para la osmosis inversa.....	8
Figura 2.4 Almacenamiento del agua a tratar.....	8
Figura 2.5 Filtro de cartucho.....	10
Figura 2.6 Columna de intercambio iónico.....	10
Figura 2.7 Columna con carbón activado.....	11
Figura 2.8 Tanque de almacenamiento de agua blanda.....	11
Figura 2.9 Sistema de la osmosis inversa.....	12
Figura 2.10 Sistema de esterilización con lámpara de rayos u.v.....	13
Figura 2.11 Tanque de almacenamiento de agua purificada.....	13
Figura 2.12 Proceso de producción.....	18
Figura 2.13 Mecanismo de producción.....	18
Figura 2.14 Esquema de la Electrolisis del Agua.....	21
Figura 2.15 Energías involucradas en la reacción.....	25
Figura 2.16 Membrana Nafión.....	27
Figura 2.17 Formula del monómero de PTFE.....	27
Figura 2.18 Hoja de membrana de intercambio catiónico CMI-7000.....	28
Figura 2.19 Electrolizador alcalino.....	31
Figura 2.20 Señales de excitación en voltamperometría cíclica.....	32
Figura 2.21 Voltametría cíclica, típica del ferrocianuro de potasio.....	35
Figura 2.22 Efectos de un cambio potencial sobre las energías libres estándar de activación para oxidación y reducción.....	37
Figura 2.23 El coeficiente de transferencia como indicador de la simetría de la barrera a la reacción.....	39
Figura 2.24 Curvas de sobrepotencial de corriente para el sistema $O + e \leftrightarrow R$	42
Figura 2.25 Diagramas de Tafel para ramas anódicas y catódicas de la curva de sobrepotencial de corriente para $O + e \leftrightarrow R$	44
Figura 2.26 Leyes de Fick para la difusión lineal.....	46
Figura 3.1 Diagrama de bloques de la fase experimental.....	50
Figura 3.2 Cloruro de sodio p.a.....	60
Figura 3.3 Membrana de Intercambio Catiónico CMI – 7000.....	60
Figura 3.4 Componentes del sistema de electrolisis.....	60

Figura 3.5 Parte de la cámara anódica o catódica.....	61
Figura 3.6 Parte superior de la celda con los conectores rosca.....	61
Figura 3.7 Vista de perfil de la celda.....	61
Figura 3.8 Parte frontal de la celda.....	62
Figura 3.9 Instalación de la membrana y electrodos.....	62
Figura 3.10 Montaje final del sistema de producción de agua alcalina ionizada.....	62
Figura 3.11 Mecanismo de producción del agua alcalina ionizada.....	63
Figura 3.12 Sistema de electrolisis para produccion del agua alcalina ionizada.....	64
Figura 3.13 Armado del sistema para la voltamperometría cíclica.....	65
Figura 3.14 Electrodo de referencia de Calomel.....	66
Figura 3.15 Potenciostato Gamry.....	66
Figura 3.16 Vista de los barridos de potencial vs intensidad de corriente.....	66
Figura 4.1 Curvas pH vs tiempo “t”.....	72
Figura 4.2 Curvas ORP vs tiempo “t”.....	72
Figura 4.3 Curvas TDS vs tiempo “t.....	73
Figura 4.4 Curvas de conductividad eléctrica “k” vs t.....	73
Figura 4.5 Voltamperograma cíclico a la velocidad de barrido de 5 mV/s.....	74
Figura 4.6 Barridos de potencial vs corriente por voltamperometría lineal.....	78
Figura 4.7 Grafica de Tafel “n” vs “Ln i ”.....	79
Figura 4.8 Curvas de Tafel mediante la regresión lineal.....	80
Figura 4.9 Determinación de los efectos e interacciones significativas.....	84
Figura 4.10 Efectos en las respuestas de pH de acuerdo a los factores.....	86
Figura 4.11 Efectos en las respuestas de ORP de acuerdo a los factores.....	87
Figura 4.12 Efectos en las respuestas del Costo de acuerdo a los factores.....	88
Figura 4.13 Interacciones de efectos en las respuestas del pH, ORP, Costo de acuerdo a los valores de los factores.....	89
Figura 4.14 Optimización del pH.....	90
Figura 4.15 Optimización del ORP.....	91
Figura 4.16 Optimización del Costo.....	91
Figura 4.17 Condiciones óptimas de la obtención del agua alcalina.....	94
Figura 4.18 Curvas de concentración de cationes Vs tiempo.....	98
Figura 4.19 Modelo del problema de difusión en la superficie del cátodo.....	100
Figura 4.20 Modelo del problema de difusión en la superficie del ánodo.....	103

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Empresas embotelladoras de agua, alcance y ubicación.....	2
Tabla 2.1 Efecto de la membrana en el rendimiento del ionizador.....	19
Tabla 2.2 Análisis elemental del agua de entrada y salida del ionizador.....	20
Tabla 2.3 Análisis elemental de agua de alimentación y agua ionizada alcalina del ionizador con ánodo de titanio y cátodo SS316L.....	23
Tabla 2.3 Modos de transporte de materia.....	45
Tabla 3.1 Proceso de purificación del agua por “Flor de Agua S.R.L.”.....	52
Tabla 3.2 Factores y respuestas del proceso de electrolisis.....	67
Tabla 4.1 Resultados de los análisis del agua de osmosis inversa del LCA.....	69
Tabla 4.2 Requisitos físicos, químicos, microbiológicos para el agua según la norma boliviana NB 512: 2016.....	70
Tabla 4.3 Valores de Ecelda y Rcelda.....	71
Tabla 4.4 Ecelda mínimo que se debe aplicar para que ocurra la electrolisis.....	71
Tabla 4.5 Resultados de la parte anódica y catódica del voltagrama.....	75
Tabla 4.6 Tabla de los factores del proceso.....	82
Tabla 4.5 Respuestas del diseño experimental.....	83
Tabla 4.6 Condiciones de optimización.....	91
Tabla 4.7 Soluciones de la optimización.....	92
Tabla 4.8 Soluciones óptimas para la obtención del agua alcalina ionizada.....	93
Tabla 4.9 Valores de las condiciones óptimas a aplicar en la obtención del agua alcalina ionizada.....	94
Tabla 4.10 Resultados de los análisis del laboratorio de Calidad Ambiental LCA para el agua alcalina ionizada.....	95
Tabla 4.11 Resultados de los análisis del laboratorio de Calidad Ambiental LCA para el agua alcalina ionizada “XYZ”.....	96
Tabla 4.12 Resultados de los análisis del laboratorio de Calidad Ambiental LCA para el agua acida.....	97
Tabla 4.13 Datos del proceso de producción del agua alcalina ionizada.....	99
Tabla 4.14 Variables y resultados de la producción final del agua alcalina.....	105
Tabla 4.15 Costos de materiales y equipos.....	105
Tabla 4.16 Costos para la producción de 500 mL de agua alcalina ionizada.....	106

CAPITULO I:
INTRODUCCIÓN AL PROYECTO

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN AL PROYECTO

1.1. ANTECEDENTES

La vida en la tierra depende totalmente del agua, un alto porcentaje de seres vivos, tanto plantas como los animales se encuentran en el agua. El organismo humano opera a máxima eficiencia cuando el pH de la sangre es ligeramente alcalina con un pH de 7,36. Siguiendo una dieta principalmente alcalina en alimentos, bebiendo agua alcalina y modificando su estilo de vida para evitar la producción de ácidos, con actividades que uno puede comenzar a desintoxicar su cuerpo, eliminando el exceso de proteínas y desechos ácidos, que crean inflamación y cambios degenerativos. (Khushboo, 2014)

La ionización divide la molécula de agua en iones H^+ y OH^- , al beber el agua con los iones OH^- alcalinos ricos en oxígeno, se dispone de más oxígeno para enriquecer la sangre que puede aumentar el nivel de energía y promover una curación más rápida. Las moléculas ionizadas de OH^- tienen electrones adicionales que neutralizan los radicales libres destructivos circulando por todo el cuerpo y así permitir los procesos naturales de curación del cuerpo para predominar ralentizar el proceso de envejecimiento y promover la salud. La ionización da como resultado abundantes minerales alcalinos como el calcio y su forma ionizada contribuyen a la "quema" de grasas y carbohidratos ayudando así a reducir el peso y eliminar la obesidad. (Khushboo, 2014)

Los ionizadores de agua originalmente diseñados en Japón, se han convertido en una industria importante y en constante crecimiento dentro del país. Numerosos fabricantes se han agrupado formando una organización llamada La Asociación de Aparatos de Agua Ionizada Alcalina. Además, de acuerdo con los consejos contenidos en los folletos de instrucciones que acompaña al aparato, se recomienda beber 1,5–2,0 L de agua diarios independientemente de la edad, el sexo y estado de salud. (Marc, 2013)

En 1999, en el 25° Congreso General de la Asociación Japonesa de Ciencias Médicas, el informe se presentó bajo el título Electrolytic Functional Water in Medical Treatment, esbozó la conclusiones de las primeras pruebas clínicas que establecen que el agua ionizada es eficaz y útil en el tratamiento de enfermedades gastrointestinales. (Marc, 2013)

En la tabla 1.1, se observa una diversidad de empresas ubicadas principalmente en las ciudades capitales de departamento, donde se encuentran localizadas sus plantas de producción.

Tabla 1.1

Empresas embotelladoras de agua, alcance y ubicación

N°	Empresa	Marcas	Planta de producción	Destino de ventas								
				SCZ	LPZ	CBB	CHQ	ORU	TRJ	PTS	BEN	
1	Agua María	Agua María	Cochabamba			x						
2	Aje	Cielo	Santa Cruz	x	x	x						
3	Aramayo	Aramayo	Tarija						x			
4	Bebidas Bolivianas	Bebidas Bolivianas	Santa Cruz	x	x	x				x		
5	Cascada del Oriente	Villa Santa	Santa Cruz	x								
6	Cascada del Sur	Villa Santa	Tarija			x				x		
7	Del Norte	Aguas Claras	Santa Cruz	x								
8	DELIZIA	Glaciar	La Paz	x	x	x	x	x	x	x	x	x
9	El Paso	El Paso	Cochabamba			x						
10	Elaboración de Bebidas	Agua Viña	Cochabamba			x						
11	EMBOL	Vital	Santa Cruz	x	x	x	x	x	x	x		
12	INAL	Uma plus	La Paz		x							
13	La Cascada	Villa Santa	La Paz		x							
14	Naturaleza	Naturaleza	Cochabamba			x						
15	Nudelpa	Nudelpa	Beni									x
16	PIL Andina	Pura vida	Cochabamba	x	x	x	x	x	x	x	x	x
17	PRODELAC	PRODELAC	La Paz		x							
18	PROVEL	PROVEL	Potosí								x	
19	PURIFICA	PURIFICA	Chuquisaca					x				
20	Salvietti del Sur	Viva	Chuquisaca					x				
21	SANIFER	Pura agua	La Paz		x							

Fuente: Estudio De Mercado De Agua Embotellada En Bolivia, 2019

La ubicación geográfica de las empresas estudiadas, en una gran mayoría, se registra en los departamentos de Santa Cruz (25%), Cochabamba (25%) y La Paz (20%), este aspecto se debe a que en estas regiones se registra el mayor consumo.

En nuestro país todas las empresas embotelladoras de agua excepto la empresa Aguas del Horeb, comercializan agua por el proceso de osmosis inversa, por lo que no se encuentra mucha diferencia en el aspecto nutricional del producto, pero que aun así hay consumo por la población; un valor agregado al agua sería producir agua alcalina ionizada en el que su consumo traerá muchos beneficios a la salud, con lo que al realizar el estudio para la producción de agua alcalina ionizada se podrá transmitir este proceso a aquellas empresas embotelladoras de agua que quieran mejorar su producto que es el agua.

En el departamento de La Paz la empresa Aguas del Horeb, su planta se encuentra ubicada en la zona de Villa Armonía, su maquinaria puede procesar hasta 5.000 L de agua alcalinizada por día, cerca de 130.000 L al mes, el nombre del producto es “Ion Life”, actualmente comercializa en La Paz, El Alto, Cochabamba, Oruro, Sucre y Potosí. (Ion Life, 2017)

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente la población de Bolivia la gran mayoría consumen alimentos formadores de ácido, los cuales por ejemplo son: carne, lácteos, bebidas carbonatadas, alcohol, café, edulcorantes, comidas fritas con mucho contenido de aceites grasos y otros.

Como consecuencia de esta mala alimentación el organismo de las personas hace que sufra de acidez. Por lo tanto, cuando el cuerpo está fuera del equilibrio del pH, comienza el proceso de la enfermedad, lo que resulta en problemas que van desde la pérdida ósea, envejecimiento prematuro hasta los problemas gastrointestinales y otros, algo a saber es que cuando el cuerpo disfruta del equilibrio del pH se experimenta una buena salud.

Para solucionar esta problemática en la salud de las personas se debe combatir la acidez ingiriendo alimentos alcalinos, los cuales deben ser ricos en potasio, sodio, magnesio y calcio para que el organismo no tenga que sufrir disminución de minerales para alcalinizar la sangre, y así lograr el equilibrio del pH.

Una alternativa para la solución de este problema es consumir agua alcalina ionizada producida por el proceso de la electrolisis, los beneficios de esta agua son: pH superior al neutro para disminuir la acidez en el organismo, esta agua tendrá una mejor concentración de iones de calcio, magnesio, potasio y sodio, estos serán asimilados de mejor manera por las células del organismo. Además por el proceso de ionización se tendrá un poder antioxidante, el cual ayudara al organismo a neutralizar los radicales libres y de reducir el nivel de oxidación celular.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

- Obtener agua alcalina ionizada a partir de agua de osmosis inversa, mediante el proceso de la electrolisis.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la calidad del agua de osmosis inversa para la alimentación del proceso.
- Diseñar, construir la celda electrolítica a nivel laboratorio.
- Determinar los parámetros electroquímicos del proceso.
- Determinar mediante el diseño experimental las condiciones óptimas de producción.
- Obtener la cinética del proceso.
- Comparar los parámetros de calidad del agua alcalina obtenida con los de la Norma Boliviana NB 512:2016
- Realizar el análisis del costo de producción a nivel laboratorio para el producto obtenido.

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.4.1. Justificación académica

La formación recibida a lo largo de nuestros estudios, nos permite el conocimiento y técnicas para transformar la materia prima, intermedia o final de un proceso, en precursores o productos nuevos, siendo esta la herramienta fundamental para la reutilización, reciclaje de estos componentes. Aplicar y profundizar los conceptos teóricos y prácticos, el presente trabajo pretende llevar a cabo el estudio para poder producir agua alcalina ionizada, para ello se utilizará los conocimientos adquiridos en la carrera como ser (Electroquímica Industrial, Microbiología Industrial, Control de calidad, Ingeniería de Alimentos, Química Analítica, Etc.).

1.4.2. Justificación económica

Debido a la gran demanda en el mercado del agua de mesa embotellada, nos encontramos en la necesidad de innovar y dar valor agregado al agua mediante el proceso de electrolisis, para obtener agua alcalina ionizada, en Bolivia hay una empresa que se dedica a su comercialización, esto por el alto costo de los equipos, por lo que si se optara en implementar la producción de agua alcalina se pretendería que las empresas embotelladoras opten por este método, no muy costoso, para la comercialización de un nuevo producto con muchos beneficios a la salud de las personas, trayendo consigo beneficios socioeconómicos en Bolivia.

1.4.3. Justificación ambiental

En el proceso de producción de agua alcalina se obtiene al mismo tiempo el agua acida electrolizada, por lo tanto, tiene un pH ligeramente ácido y este no sería apropiado desecharlo al ambiente. Esta agua se presenta como una alternativa muy eficaz en los procedimientos de desinfección, frente al uso tradicional de soluciones cloradas. Por lo tanto, será una alternativa al uso de soluciones cloradas que son muy utilizadas para la desinfección actualmente.

1.5. ALCANCE Y LIMITACIONES

El proyecto constituye una investigación innovadora, por lo cual la investigación se realizara a nivel laboratorio para la obtención del agua alcalina ionizada por el proceso de la electrolisis, se tiene cierta información de investigación y existencia del producto en el mercado.



CAPITULO II:
FUNDAMENTO TEÓRICO

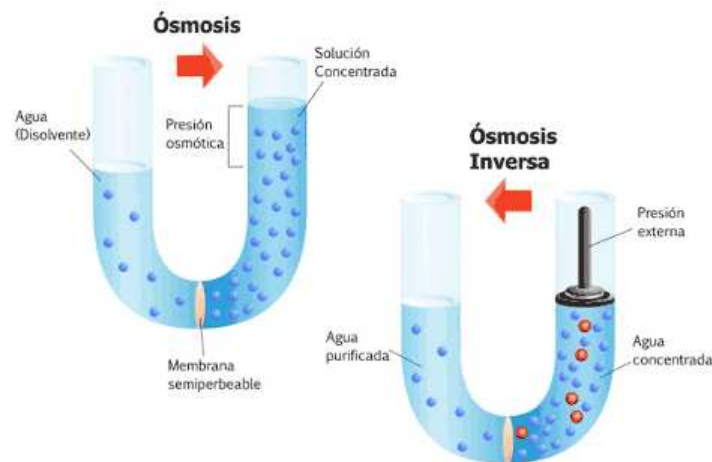
CAPITULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. PROCESO DE OSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa (OI) es un proceso en el cual se reduce el caudal a través de una membrana semipermeable y se ejerce una fuerza de empuje superior a la presión osmótica en dirección opuesta al proceso de ósmosis. De esta forma se logra separar las sustancias que se encuentran en el agua en un lado de la membrana (concentrado) y del otro lado se obtiene una solución diluida baja en sólidos disueltos (permeado). (Carbotecnia, 2022)

Figura 2.1 Osmosis inversa

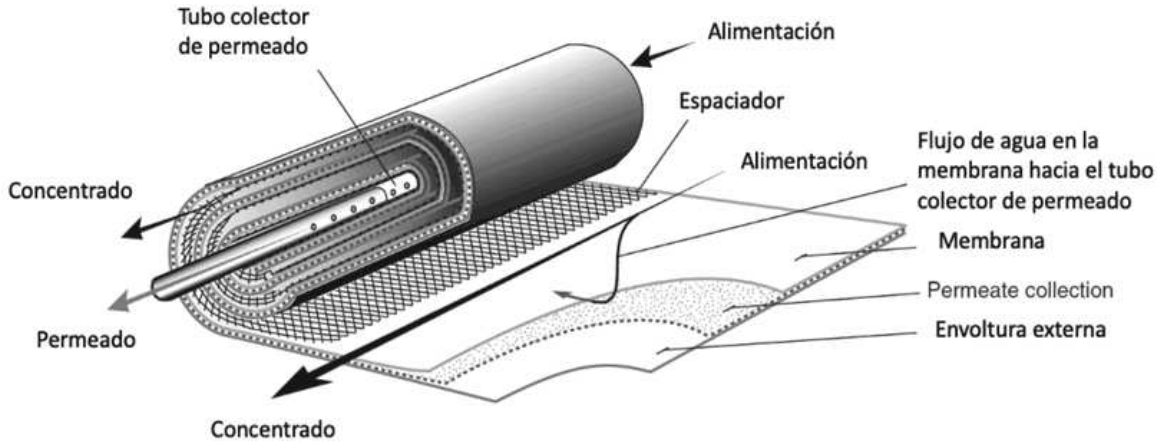


Fuente: Carbotecnia, 2022

2.2. MEMBRANA

Este elemento se fabrica al enrollar membranas en forma de espiral, suelen medir 40 o 60 pulgadas de largo, y los diámetros más comunes son de 4 o 8 pulgadas. Durante la operación el agua entra a presión por un lado, a medida que esta fluye de forma tangencial a la membrana, parte de ella pasa por la superficie de la membrana hacia el colector de permeado, mientras que el agua con alta concentración de sales sale por el otro extremo de la membrana. En la Figura 2.2 se pueden apreciar los elementos de una membrana. (Carbotecnia, 2022)

Figura 2.2 Elementos de la membrana de osmosis inversa



Fuente: (Carbotecnia, 2022)

Figura 2.3 Membrana usada para la osmosis inversa



Fuente: (Bio-quim, 1999)

2.3. PROCESO DE PURIFICACIÓN DEL AGUA MEDIANTE LA OSMOSIS INVERSA, DE LA EMPRESA “FLOR DE AGUA UNIKA S.R.L.”

2.3.1. Proceso 1: Almacenamiento del agua a tratar

Las medidas a tomar en cuenta luego de la extracción y almacenamiento del agua:

✓ **Sistema de dosificación de pre-cloración**

Si el agua de alimentación contiene trazas de metales pesados o está contaminada, es recomendable dosificar algo de cloro para transformar los metales pesados disueltos a su forma física, así el filtro de medios podrá filtrar la mayor parte de ellos.

✓ **Bomba de agua de alimentación**

Una bomba proporciona la presión inicial para el sistema de tratamiento. Este motor generalmente proporciona suficiente presión de agua para pasar a través de cualquier pretratamiento así como también de las membranas OI.

Figura 2.4 Almacenamiento del agua a tratar



Fuente: Elaboración en base a la Empresa Flor de Agua S.R.L

2.3.2. Proceso 2: Filtro de cartucho

Hay algunas cosas que las membranas no pueden purificar. Por ejemplo, los nitratos, un contaminante común que se encuentra en los fertilizantes y desechos de animales, son partículas que se disuelven demasiado bien en el agua para que la ósmosis inversa las atrape

Figura 2.5 Filtro de cartucho



Fuente: Elaboración en base a la empresa Flor de Agua S.R.L

2.3.3. Proceso 3: Columnas de intercambio iónico

El intercambio iónico es un proceso para controlar la pureza y el pH del agua mediante la eliminación de iones indeseables y su sustitución por otros aceptables.

Hay dos tipos generales de resinas de intercambio iónico: las que intercambian iones positivos y las que intercambian iones negativos.

El ablandamiento trata de la eliminación de iones de calcio (Ca) y magnesio (Mg), que hacen a un agua ser dura.

Figura 2.6 Columna de intercambio iónico



Fuente: Elaboración en base a la empresa Flor de Agua S.R.L

2.3.4. Proceso 4: Columna de carbón activado

Son una buena solución para reducir elementos orgánicos como el mal sabor y el olor, también el cloro del agua.

El carbón activado es un adsorbente efectivo porque es un material altamente poroso y proporciona una gran superficie a la que los contaminantes pueden adherirse químicamente.

Figura 2.7 Columna con carbón activado



Fuente: Elaboración en base a la empresa Flor de Agua S.R.L

2.3.5. Proceso 5: Almacenamiento del agua blanda en tanques

Después del tratamiento del agua por intercambio iónico y carbón activado, se procede al almacenamiento del agua a los tanques de pre tratamiento que contendrán al agua blanda.

Figura 2.8 Tanque de almacenamiento de agua blanda



Fuente: Elaboración en base a la empresa Flor de Agua S.R.L

2.3.6. Proceso 6: Sistema de osmosis inversa

- ✓ Después del ablandamiento se bombea el agua a las columnas en el que se encuentran las membranas de Osmosis Inversa.
- ✓ La bomba debe seleccionarse en acero inoxidable para evitar cualquier contaminación del agua permeada.
- ✓ El sistema de ósmosis inversa puede producir hasta un millón de litros de agua producida al día a partir de un suministro constante, así también una cantidad considerable de desechos. Por lo general, los desechos (aguas residuales) se pueden tirar por el desagüe o ser utilizadas.

Figura 2.9 Sistema de la osmosis inversa



Fuente: Elaboración en base a la empresa Flor de Agua S.R.L

2.3.7. Proceso 7: Esterilizador ultravioleta para tratar el agua producida

Se coloca después de haber realizado el tratamiento en las membranas de osmosis, el cual es utilizado como dispositivo de desinfección final.

Figura 2.10 Sistema de esterilización con lámpara de rayos u.v.



Fuente: Elaboración propia en base a la empresa Flor de Agua S.R.L

2.3.8. Proceso 8: Tanque de almacenamiento de agua purificada

El permeado del sistema de purificación de OI irá a un tanque grande de almacenamiento para su uso.

Figura 2.11 Tanque de almacenamiento de agua purificada



Fuente: Elaboración propia en base a la empresa Flor de Agua S.R.L

2.3.9. Control de calidad al agua

- ✓ La calidad del agua es un objetivo general para la salud pública, en el cual se garantiza que el agua de consumo sea salubre y limpia, eliminando o reduciendo la concentración de contaminantes biológicos o fisicoquímicos que afecten a la salud.
- ✓ Desde la extracción del agua bruta, el pre tratamiento y los tratamientos finales, se realizan análisis del agua mediante muestreos y se comparan así los parámetros del agua con los valores estándar para asegurarse que todo esté controlado en ciertos límites

2.3.9.1. Parámetros químicos

- ✓ pH

Que es un elemento importante para definir el carácter agresivo o incrustante de un agua, pH menor a 7 puede conducir a la corrosión de tuberías, pH elevado puede conducir a depósitos incrustantes en los circuitos de distribución.

- ✓ Conductividad

Cuyos valores indican la concentración de sólidos disueltos.

- ✓ Turbidez

Que está causada por las partículas que por su tamaño se encuentran suspendidas y reducen la transparencia en menor o mayor grado, el cual afecta la calidad estética

2.3.9.2. Parámetros físicos

- ✓ Color

El cual la característica del agua puede estar ligada a la turbidez. También el olor y el sabor están estrechamente relacionados y constituyen el motivo principal motivo de rechazo por parte del consumidor.

2.3.9.3. Parámetros microbiológicos

Se encuentran las bacterias Coliformes que se encuentran en el intestino del ser humano, animales y otros ambientes. El importante índice de contaminación fecal es la Escherichia Coli ya que su origen fecal es seguro.

2.4. EL AGUA ALCALINA IONIZADA

El organismo humano opera a máxima eficiencia cuando el pH de la sangre es ligeramente alcalina con un pH de 7,36, siguiendo una dieta principalmente alcalina de alimentos, bebiendo agua alcalina y modificando su estilo de vida para evitar la producción de ácido, con actividades que uno puede comenzar a desintoxicar su cuerpo, eliminando el exceso de proteínas y desechos ácidos, que crean inflamación y cambios degenerativos. El agua puede ser ácida o alcalina, si el residuo de alimentos o agua es principalmente azufre, fósforo, cloro, radicales de ácido orgánico, entonces se produce una condición ácida, radicales de ácido orgánico, entonces se produce una condición ácida. (Khushboo, 2014)

2.4.1. Tipos de agua:

2.4.1.1. Agua ácida

Es ideal para uso externo, es agua astringente que es excelente para la piel. Sus ligeras características blanqueadoras, constrictivas y oxidantes son perfectas para la limpieza, el lavado y una variedad de aplicaciones tópicas. Pero en exceso no es adecuado para el cuerpo ya que crea acidosis. (Khushboo, 2014)

2.4.1.2. Agua alcalina

Es agua suave, energizante, limpiadora y de gran sabor que tiene una combinación de características únicas. Esta micro agua posee una absorción sin igual y habilidades hidratantes. Alto en minerales alcalinizantes, ayuda a amortiguar los efectos negativos de sobre condiciones de salud ácida. Con una abundancia de electrones disponibles, ionizados alcalinos el agua hace que los radicales libres que destruyen las células sean inofensivos. (Khushboo, 2014)

2.4.2. Necesidad del consumo de agua alcalina para los humanos

El cuerpo solo puede procesar una cierta cantidad de ácido, por lo que es posible sobrecargar el sistema y que el cuerpo se vuelva demasiado ácido. La carne incluyendo carne de res, cerdo, pollo y pavo, es ácido. Los productos lácteos como la leche, la mantequilla y el queso también son ácidos.

Granos como el arroz y la cebada, así como las patatas, la pasta y el pan, también son ácidos. El café, el té y los refrescos son extremadamente ácido. Estos productos dietéticos aumentan la acidez y conducen a la generación de muchas enfermedades. (Khushboo, 2014)

La alimentación de todos los humanos en el mundo actualmente, se ve que consumen alimentos formadores de ácidos, como ser las famosas comidas rápidas “Snacks”, bebidas carbonatas, alimentos con demasiado contenido de azúcar y muchos otros. Por lo tanto, urge una necesidad de poder neutralizar el cuerpo con alguna sustancia alcalina que no sea dañina ni perjudicial para la salud de los humanos.

2.4.3. Necesidad de antioxidantes

El oxígeno es esencial para la supervivencia, es relativamente estable en el aire, pero cuando se absorbe demasiado en el cuerpo se vuelve activo e inestable y conduce a la generación de radicales libres. Los radicales libres son inestables y tienen un alto potencial de oxidación, lo que significa que son capaces de robar electrones de otras células. Dentro del cuerpo los radicales libres son de gran beneficio debido a su capacidad para atacar y eliminar bacterias, virus y otros productos de desecho. Se cree que algunas sustancias tienen actividad contra el oxígeno libre radicales, estos se llaman antioxidantes. (Khushboo, 2014)

2.4.4. Peligros debidos al demasiado ácido

Cuando el cuerpo se desequilibra y se vuelve demasiado ácido, nuestra salud se ve directamente afectada y se vuelve susceptible a muchos problemas de salud, incluyendo: falta de energía, fatiga, aumento de peso, dolores musculares, resfriados y gripe frecuentes, congestión nasal y exceso de producción de moco, ansiedad e irritabilidad, mala digestión. (Khushboo, 2014)

2.4.5. Ventajas del agua ionizada alcalina

- La ionización eleva el pH del agua del grifo de alrededor de 7 (neutro) a 9.5 (alcalino). El agua alcalina actúa como disolvente sobre los desechos ácidos (como las grasas, el ácido úrico y el colesterol) los cuales se almacena en el cuerpo y lo disuelve para ser eliminado por la sangre y orina.
- La ionización reduce el tamaño de la ramificación molecular de agua a la mitad, este que es más pequeño puede penetrar en las membranas celulares del cuerpo más fácilmente, acelerando así la construcción de nuevos tejidos y la eliminación de desechos. Los grupos

más pequeños también significan que el agua ionizada alcalina es más hidratante y ayuda a reducir las arrugas y mantener la piel flexible y tersa.

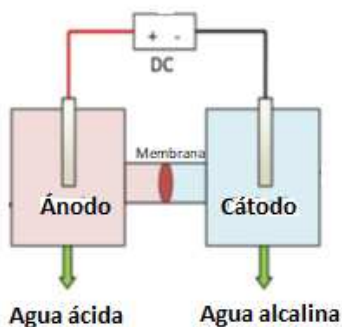
- La ionización divide la molécula de agua en iones H^+ y OH^- . Al beber el agua con los iones OH^- alcalinos ricos en oxígeno, se dispone de más oxígeno para enriquecer la sangre que puede aumentar el nivel de energía y promover una curación más rápida
- Las moléculas ionizadas de OH^- tienen electrones adicionales que neutralizan los radicales libres destructivos circulando por todo el cuerpo y así permitir los procesos naturales de curación del cuerpo para predominar ralentizar el proceso de envejecimiento y promover la salud.
- La ionización da como resultado abundantes minerales alcalinos como el calcio en su forma ionizada contribuyen a la "quema" de grasas y carbohidratos ayudando así a reducir el peso y eliminar la obesidad.
- La mayoría de las enfermedades ocurren en condición ácida del cuerpo, por lo tanto, una condición alcalina tiene que se crean para prevenir las enfermedades y esto se puede hacer consumiendo alimentos que contengan más alcalinidad y bebiendo agua alcalina. (Marc, 2013)

2.5. MECANISMO DE FUNCIONAMIENTO DE UN IONIZADOR ALCALINO

El dispositivo funciona según el principio de electrólisis del agua, la cámara del ánodo y la cámara del cátodo se llenan con agua subterránea enriquecida con minerales y agua potable purificada por nano filtración simultáneamente. Al encender la fuente de alimentación al dispositivo ionizador, se produce una diferencia de potencial eléctrico a través de los electrodos, donde se producen reacciones de oxidación y reducción en el ánodo y el cátodo, respectivamente, como se muestra a continuación. Las reacciones de oxidación que ocurren cerca del ánodo generan iones H^+ e iones OH^- . Los iones OH^- pierden electrones al ánodo cargado positivamente para producir $O_2 \uparrow$ lo que conduce a un aumento de la concentración de iones H^+ en la cámara del ánodo. Por lo tanto, el pH del agua en la cámara del ánodo disminuye gradualmente. El mecanismo para la generación de agua alcalina y ácida se muestra en la Fig. 2.13. Las reacciones de reducción cerca del cátodo generan iones H^+ e iones OH^- . Los iones H^+ absorben los electrones del cátodo cargado negativamente para producir $H_2 \uparrow$, que resulta en la acumulación de iones OH^- en la cámara del

cátodo. Estos iones causan alcalinidad al agua reducida en la cámara del cátodo. El $H_2\uparrow$ evoluciona cerca del cátodo, disolviéndose parcialmente en agua alcalina. (Vadthya, 2019)

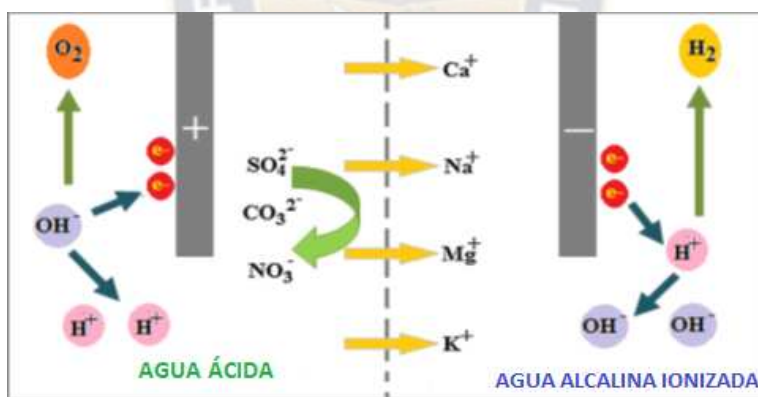
Figura 2.12 Proceso de producción



Fuente: (Vadthya, 2019)

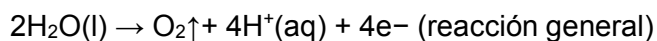
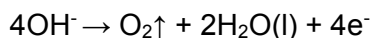
La electrolisis del agua causará un aumento en el pH del agua en la cámara del cátodo y una disminución del pH en el ánodo, la alimentación de la fuente de poder terminará hasta que el pH se vuelva constante, por lo que también se tomarán medidas de ORP

Figura 2.13 Mecanismo de producción

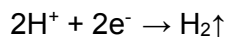
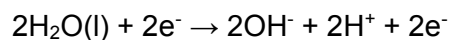


Fuente: (Vadthya, 2019)

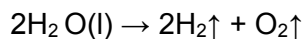
Oxidación en el ánodo



Reducción en el cátodo



Reacción total en la celda



2.5.1 Características Físicoquímicas Del Agua Alcalina Ionizada

En la tabla 2.1, se muestra el análisis elemental del contenido iónico dentro de los niveles deseables utilizando las membranas mencionadas. Aunque se eligió el electrodo no corrosivo como ánodo, todavía existe la posibilidad de presencia de cationes no deseables en el agua de alimentación de la cámara del ánodo. Las observaciones muestran que la membrana CMI-7000 era más permeable a los cationes seguida de la membrana PES. (Vadthya, 2019)

Tabla 2.1
Efecto de la membrana en el rendimiento del ionizador

Membrana	Flujo general a alcanzar 9 pH, L.h ⁻¹	pH maximo alcanzado	Flujo general para alcanzar el maximo pH, L. h ⁻¹	ORP (mV) a pH maximo
CMI-7000	1.42	9.95	0.66	-250
SPES-PVC	1.17	9.60	0.60	-153
PES	1.47	9.82	0.64	-250
PES-PVA-PEG	1.33	9.97	0.77	-250
Espuma	1.22	9.36	0.62	-99
Sin membrana	1.00	9.84	0.62	-119

Fuente: (Vadthya, 2019)

La Tabla 2.2 muestra el análisis elemental del agua ionizada alcalina y el agua ácida producida por el ionizador utilizando el electrodo SS316 L como cátodo y ánodo utilizando la membrana CMI-7000 hasta el logro del pH máximo. Se muestra el enriquecimiento de macro minerales como Na, Ca, Mg, K en el agua ionizada alcalina obtenida de la cámara catódica.

La presencia de Ca es esencial para la salud ósea; K y Mg son necesarios para el buen funcionamiento del sistema nervioso y las contracciones musculares. Los niveles de Na mantienen el equilibrio de líquidos en el cuerpo humano.

En la tabla 2.2 se tiene una lista de límites deseables (norma de la OMS) para el contenido mineral en el agua potable.

La Tabla 2.3 muestra los resultados para el agua ionizada alcalina producida por el ionizador con ánodo de titanio y cátodo SS316 L utilizando diferentes membranas hasta alcanzar el pH máximo.

Todos los valores se proporcionan en mg/L. Inicialmente, la cámara del ánodo se llenó con agua del grifo y la cámara del cátodo se llenó con agua de nano filtración. Después de la operación del ionizador para alcanzar el pH máximo en la cámara del cátodo, se realizó el análisis elemental de agua alcalina reducida y agua ácida

Tabla 2.2

Análisis elemental del agua de entrada y del agua de salida del ionizador con electrodos SS316L

Fuente: (Vadthya, 2019)

iones metálicos *	agua del grifo (cámara de ánodo)	agua de nanofiltración (cámara catódica)	Agua ácida (cámara de ánodo)	Agua alcalina reducida (cámara catódica)	Límite de la OMS	Referencia
Ca	> 10	6.023	> 10	8.045	75	[39]
Na	> 10	> 10	> 10	> 10	20-40	[40]
K	2.938	0.605	2.332	0.913	10	
Mg	> 10	2.32	> 10	4.002	30	[41]
Fe	0	0.002	0.258	0	1	[42]
Cu	0	0	0	0	0.3	[39]
Se	0	0	0.032	0	0.04	[43]
P	0	0	0	0	-	-
Mn	0	0	1.295	0	0.1	[42]
Ni	0.005	0	0.014	0	0.02	[42]
Cr	0.0005	0	0.026	0.0011	0.05	[42]
Pb	0.002	0	0.003	0.0001	0.01	[42]
Ti	0.001	0	0.001	0	0.1	[44]
Al	0.01	0	0.004	0.002	0.1	[42]
Cd	0	0	0	0	0.002	[42]

* Concentración de iones en mg/L

Tabla 2.3 Análisis elemental de agua de alimentación y agua ionizada alcalina del ionizador con ánodo de titanio y cátodo SS316L

Elementos	Agua de alimentación	Agua ionizada alcalina			
		PES	CMI-7000	PEG/PES/PVA	SPES/PVC
Ca	3.346	5.78	8.0454	4.065	5.31
Na	10.13	12.34	13.5	12.62	12.7
K	0.619	0.918	0.91345	0.561	0.69
Mg	1.564	3.44	4.0021	1.955	1.96
Fe	0.002	0	0	0.015	0.002
Cu	0	0	0	0	0
Se	0	0	0	0	0
P	0.024	0.008	0	0.113	0.02
Mn	0.0004	0	0	0	0
Ni	0	0	0	0	0
Cr	0.0005	0	0	0	0
Pb	0.0003	0	0	0	0
Ti	0.001	0	0	0	0
Al	0.004	0.004	0	0	0
Cd	0.0001	0	0	0	0

* Concentración de iones en mg/L

Fuente: (Vadthya, 2019)

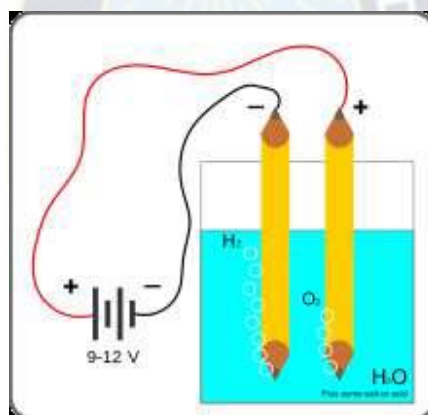
2.6. ASPECTOS GENERALES DEL PROCESO DE LA ELECTROLISIS

2.6.1. Electrolisis del agua para producción de H₂

La electrolisis del agua está definida como la descomposición de agua en los gases oxígeno (O₂) e hidrógeno (H₂) por medio de una corriente eléctrica continua conectada al agua por medio de electrodos. Actualmente, casi todo el hidrógeno producido a escala global tiene como origen el reformado de gas natural, situación que se mantendrá mientras los precios del gas no cambien de manera drástica. Es el método que permite obtener hidrógeno a un menor coste económico. (Romero, 2018)

En la figura 2.14 aparece un esquema grafico del funcionamiento de un proceso de electrolisis general:

Figura 2.14 Esquema de la Electrolisis del Agua



Fuente: (Romero, 2018)

Normalmente, se añade un electrolito fuerte (por ejemplo hidróxido de sodio NaOH, para aumentar la conductividad del agua mejorando de esta forma la transmisión de corriente. Se conecta la fuente de energía a los dos electrodos fabricados normalmente con metales inertes para que no intervengan en la reacción (acero inoxidable y platino los más usuales) que estarán en contacto con el agua. Aparecerá una carga en cada uno de los electrodos, por lo que pasarán a diferenciarse a partir de ahora como cátodo (cargado negativamente, electrodo en el que se producirá la reacción de reducción) y ánodo (cargado positivamente, en este electrodo se produce la reacción de oxidación). (Romero, 2018)

En resumen, se pueden considerar varias fases en el proceso completo de electrolisis:

- **Ionización:** Fase previa de disolución del compuesto antes de que entre en contacto con la corriente eléctrica.

- **Orientación:** Con la corriente eléctrica activa, los iones, según su carga positiva o negativa, se dirigen hacia cátodo y ánodo.

- **Descarga:** Los aniones, ya situados en el ánodo, ceden electrones, mientras que los cationes, localizados en el cátodo, adquieren electrones.

Se pueden distinguir dos casos para las reacciones implicadas:

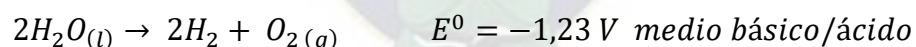
Medio básico:

- **Ánodo** $4 OH^-_{(aq)} \rightarrow O_{2(g)} + 2 H_2O_{(l)} + 4 e^-$
 $E^0_{O_2/OH^-} = 0,4 V$
- **Cátodo** $4 H_2O_{(l)} + 4 e^- \rightarrow 2 H_{2(g)} + 4 OH^-_{(aq)}$
 $E^0_{H_2O/H_2} = -0,83 V$

Medio ácido:

- **Ánodo:** $2 H_2O_{(l)} \rightarrow O_{2(g)} + 4 H^+_{(aq)} + 4 e^-$
 $E^0_{O_2/H_2O} = 1,23 V$
- **Cátodo:** $4 H^+_{(aq)} + 4 e^- \rightarrow 2 H_{2(aq)}$
 $E^0_{H^+/H_2} = 0 V$

La reacción global en ambos casos es la suma de las semireacciones:



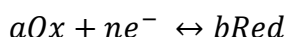
2.6.2. Potencial estándar y ecuación de Nernst

El potencial estándar para la electrolisis del agua lo obtenemos de los potenciales estándar de las semireacciones, estos voltajes se dan en condiciones estándar, es decir, 298 K y 1 bar. (Kelly, 2014).

El potencial estándar E^0 representa el voltaje mínimo para que comience la reacción (en condiciones de presión y temperatura constantes). Se relaciona con la energía libre de Gibbs mediante la ecuación:

$$E^0 = \frac{-\Delta G^0}{n * F} \quad \text{Ecuacion 2.1}$$

La ecuación que relaciona el potencial de reducción en un electrodo cuando las condiciones no son estándar es la siguiente:



$$E = E^0 - \frac{R * T}{n * F} * \ln(Q) = E^0 - \frac{R * T}{n * F} * \ln\left(\frac{[Red]^b}{[Ox]^a}\right) \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Siendo:

E: Potencial del electrodo corregido.

E^0 : Potencial en condiciones estándar.

[Red]: Concentración de la sustancia que se reduce.

[Ox]: Concentración de la sustancia que se oxida.

R: Constante de los gases.

T: Temperatura de operación (Kelvin).

n: mol de electrones que intervienen en la reacción por mol de compuesto disociado.

F: Constante de Faraday (96500 C/mol).

Q: Constante de equilibrio termodinámico.

2.6.3. Consideraciones termodinámicas

El sentido de la evolución de una reacción estará dado por la variación de alguna de las funciones termodinámicas de estado como es el caso de la energía libre de Gibbs (ΔG) o de la energía libre de Helmholtz (ΔA). Estas funciones de estado indican, para una reacción química, su condición de equilibrio y espontaneidad utilizando unidades de energía. Se utiliza ΔG para sistemas abiertos (P, T constantes) y ΔA para celdas electrolíticas cerradas (V, T constantes). En ambos casos, lo que se mide normalmente es la energía libre de reacción o cambio de energía que sufre una reacción en condiciones estándares, es decir, ΔG^0 o ΔA^0 . (Romero, 2018)

Entre estas funciones se establecen las siguientes relaciones termodinámicas:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad \text{Ecuación 2.3}$$

$$\Delta G_{reacción} = -R * T * \ln K \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$\Delta G_{H_2O}^0 = 237,75 \frac{kJ}{mol}$$

$$\Delta G^0 = -n * F * E^0 \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Donde ΔH es la entalpía, ΔS es la entropía, K la constante de equilibrio previamente mencionada, n es el número de electrones en la semireacción por mol de agua dividido ($n=2$), F es la constante de Faraday ($F = 96485 \text{ C/mol}$) y E^0 potencial estándar en voltios.

$$\Delta A = \Delta H - T * R * \Delta n - T * \Delta S \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Para la electrolisis del agua (Zoulias, 2004) se tienen los siguientes valores:

$$\Delta H^0 = 285,8 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta n = 1,5$$

$$\Delta S^0 (\text{H}_2) = 130,6 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$$

$$\Delta S^0 (\text{O}_2) = 205,1 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$$

$$\Delta S^0 (\text{H}_2\text{O}) (\text{l}) = 70 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$$

$$\Delta S^0 (\text{total}) = 130,6 + 0,5 * 205,1 - 70 = 163,14 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$$

$$\Delta A^0 = 233,1 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta G^0 = 237,2 \text{ kJ/mol}$$

A partir del valor de la energía libre puede calcularse teóricamente el valor del voltaje mínimo necesario de la celda. El resultado es:

$$E^0 = 1,23 \text{ V}$$

Y con ello puede calcularse la eficiencia máxima posible de la celda electroquímica (eficiencia ideal), definida como (Zoulias, 2004):

$$\varepsilon_{max} = \frac{\Delta H}{\Delta G} = \frac{-\Delta H}{n * F * E^0} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

En la realidad, la eficiencia de la celda se calcula como:

$$\varepsilon_{real} = \frac{-\Delta H}{n * \Delta E_{celda}} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

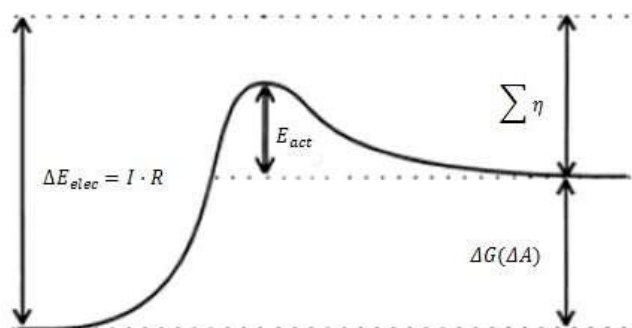
$$\Delta E_{celda} = \Delta G(\Delta A) + I * R + \sum n \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Donde ΔE_{celda} es el voltaje real aplicado, R es la resistencia óhmica total (teniendo en cuenta el electrolito, los electrodos, la membrana y la resistencia del circuito externo) y $\sum n$ es la suma de sobrepotenciales.

La expresión de la eficacia real tiene en cuenta que para que comience la electrolisis hace falta vencer varias barreras extra como son las resistencias eléctricas y los denominados sobrepotenciales, que incluyen la energía de activación (como cualquier reacción química) y el sobrepotencial de concentración para el transporte de materia desde la superficie de los electrodos hacia el exterior de los gases formados en los electrodos.

En la Figura 2.15 puede apreciarse el esquema del balance de energías durante la electrolisis del agua.

Figura 2.15 Energías involucradas en la reacción



Fuente: (Zoulias, 2004)

Como es lógico, el término $\sum \eta$ interesa mantenerlo lo más bajo posible, lo que aconsejaría operar con baja densidad de corriente (I). Sin embargo I baja disminuiría la productividad. Si se analiza la eficiencia, valores bajos de $\sum \eta$ maximizan la eficiencia pero, a su vez, reducen la velocidad de reacción. En consecuencia, hay que llegar a una solución de compromiso.

2.6.4. Parámetros electroquímicos de la electrolisis

La eficiencia disminuye a medida que aumenta la intensidad, la razón es que es al aumentar la intensidad también lo hace el sobrepotencial necesario. Por otra parte, las pérdidas óhmicas también son directamente proporcionales a la intensidad. De esta forma, las pérdidas de voltaje aumentan con la intensidad, lo que hace que la eficiencia sea menor. La ventaja de trabajar a intensidades elevadas es que el flujo de hidrógeno producido es más alto, como se ha mencionado previamente, la solución de compromiso está en encontrar el equilibrio entre eficiencia-producción. (Ahn, 2014)

Teniendo en cuenta estas consideraciones las expresiones para calcular el potencial aplicado quedan de la siguiente forma:

$$E_{celda} = E_{rev}^0 + \sum \eta_{sobrepotencial} + I * R_{celda} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

El sobrepotencial total, $\Sigma \eta$, es la suma de los sobrepotenciales de la parte anódica y catódica. Tanto “ η ” como “ $I * R_{celda}$ ” aumentan en la electrólisis.

La resistencia de la celda, será:

$$R_{celda} = R_{electrica} + R_{anodo} + R_{catodo} + R_{electrolito} + R_{membrana}$$

Ecuación 2.11

2.6.5. Consumo eléctrico

La cantidad de energía empleada en la electrolisis depende del voltaje aplicado y de la intensidad de corriente. De la misma forma que la eficiencia, hay varias formas de calcular la potencia. Para una celda electrolítica queda definida como (Pletcher, 1993):

$$P_{Real} = i * A * E_{celda} = I^2 * R_{celda} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Donde I es la intensidad de corriente y R_{celda} es la resistencia total efectiva de la celda, la cual varía en función de los sobrepotenciales, la resistencia de las membranas y la resistencia de las conexiones eléctricas.

Un parámetro característico en electrolisis, más que la intensidad, es la densidad de corriente, es decir, los amperios por unidad de superficie, por lo que para hallar el consumo de un electrolizador, primero se tendrá que conocer el área de membrana total para calcular la intensidad en amperios.

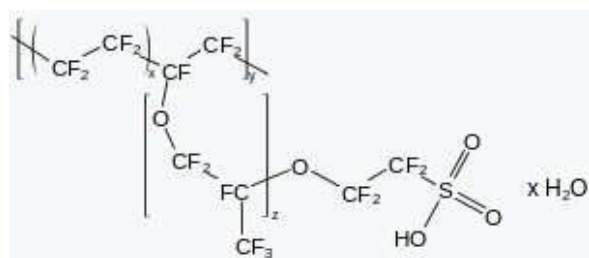
2.6.6. Uso de membranas en el proceso de la electrolisis

El elemento en el que se basan la mayoría de técnicas electrolíticas es la membrana. Las membranas de intercambio iónico transportan los iones disueltos a través de una membrana polimérica conductora. Se pueden distinguir dos tipos de membranas iónicas según el ión que transporta. (Romero, 2018)

2.6.6.1 Membranas de intercambio catiónico

Se utilizan en la electrolisis PEM, están formadas por grupos cargados negativamente como $-\text{SO}_3$, $-\text{COO}$, PO_3H ... fijos en el esqueleto de la membrana, que permiten el paso de los cationes de una solución electrolítica mientras excluyen el paso de los aniones. Las más común son: Nafión y CMI, la Nafión es un tetrafluoretileno sulfonado basado en un polímero fluorado, Figura 2.16.

Figura 2.16 Membrana Nafión



Fuente: (Romero, 2018)

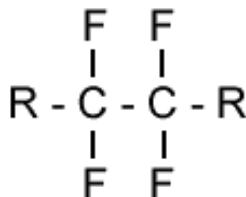
Entre sus propiedades destacan:

- Conductividad en cationes elevada.
- Muy selectiva y permeable para el agua.
- Su permeoselectividad, propiedad muy importante ya que indica la capacidad que tiene una membrana para dejar pasar o discriminar un ion según su carga
- Permeable a gases, lo que la hace adecuada para electrolizadores y pilas de combustible.
- Elevada permeoselectividad
- Baja resistencia eléctrica
- Alta estabilidad química

2.6.6.2 Membranas de intercambio aniónico

Se utilizan en electrolisis AEM, compuestas por grupos con carga positiva permitiendo el paso de los grupos con carga negativa.

Figura 2.17 Formula del monómero de PTFE



Fuente: (Romero, 2018)

Sus propiedades son:

- Resistencia en medios alcalinos.
- Resistencia a la oxidación.
- Altamente selectiva para el agua.
- Alta eficiencia.

En el momento de seleccionar una membrana se estudiarán factores como:

- La eficacia a distintas intensidades de corriente: Por efecto de polarización, según el rango de intensidades en el que se trabaje, conviene utilizar una u otra membrana.
- La estabilidad: Es la propiedad que hace que, para condiciones de intensidad de corriente y temperatura constante, el voltaje no varíe.
- La permeoselectividad: Define su selectividad de carga, hace referencia a la capacidad de la membrana de discriminar entre iones de carga opuesta.

2.6.6.3 Uso de la Membrana CMI-7000 para el proceso del agua alcalina ionizada

La membrana de intercambio catiónico es una membrana hecha de materiales poliméricos con permeabilidad selectiva a los iones. La membrana catiónica es generalmente de tipo ácido sulfónico, con grupo fijo e iones disociables como el ácido sulfónico de sodio: El grupo fijo es el ácido sulfónico, de los radicales disociación, el ion iónico es el ion sódico. La membrana de intercambio catiónico se puede considerar como un electrolito de polímero, y su matriz de polímero es insoluble, sin embargo, el grupo de ácido sulfónico conectado a la matriz tiene cargas negativas e iones positivos que se atraen entre sí. Son hidrófilos, debido a que la membrana catiónica tiene cargas negativas, aunque los iones positivos ligados originales se disuelven en agua por la acción de las moléculas de agua, podemos electrificar fuera de la membrana a través de la acción del campo eléctrico, y los cationes con carga positiva pueden pasar a través de la membrana catiónica, mientras que los aniones no pueden pasar por la misma repulsión, por lo que tienen permeabilidad selectiva.

Las especificaciones técnicas de la membrana de CMI - 7000 se muestran en el ANEXO A.

Figura 2.18 Hoja de membrana de intercambio catiónico CMI-7000



Fuente: (Aliexpress, 2017)

2.6.7 Selección de la celda electrolítica

La selección del tipo de celda electrolítica es un aspecto en el que intervienen diversos factores, como pueden ser los balances de materia, los datos numéricos referidos a voltajes y densidades de corriente o el diseño geométrico y sus dimensiones. Sin embargo, aun siendo importantes cada uno de esos factores, es posible hacer una primera selección partiendo de la información general de los tipos de celdas electrolíticas, de esta manera se analiza las ventajas y desventajas teóricas que ofrece cada tipo de electrolisis. Por ello, se resume la principal característica del tipo de celda que se utilizara en el proceso de producción, con el objetivo de encontrar el tipo de celda que a priori se adecúe mejor a una aplicación destinada a la producción de hidrógeno. (Romero, 2018)

- Alcalina

Ventajas:

- El sistema alcalino permite producir grandes volúmenes, en comparación a los otros sistemas que existen actualmente.
- Bajo precio.
- Estructura simple.
- Vida útil elevada.
- La vida útil de las membranas es limitada en otros sistemas, en cambio, en los sistemas alcalinos son más duraderos

Desventajas:

- Necesidad de KOH para la disolución alcalina.
- Poco compacto.
- Baja densidad de corriente.
- Habilidad limitada a operar con cargas bajas.
- Incapaz de operar a altas presiones.

2.6.7.1 Selección de parámetros de operación y diseño de la celda

La eficiencia de una celda electrolítica depende fuertemente de variables como la temperatura, el voltaje, la intensidad de corriente, etc. Se debería tratar de analizar y buscar los parámetros de operación con los que una celda electrolítica de tipo “Alcalina” puede operar en condiciones óptimas.

Cada celda electrolítica puede estar compuesta por membranas y electrodos con composiciones variables, aunque fundamentalmente compartan estructura y materiales. Al realizar la modificación de los principales componentes del electrolizador (membrana, electrocatalizador, electrodos) se podrá obtener aumentos en el rendimiento de la electrolisis.

2.6.7.2 Celda electrolítica alcalina

Actualmente dentro de la variedad de celdas electrolíticas se encuentran: celda de electrolisis alcalina, PEM, AEM y de óxidos sólidos. Pero solo se dará prioridad de estudio a la Celda de Electrolisis Alcalina, ya que presenta mejores beneficios para el proceso a estudiar.

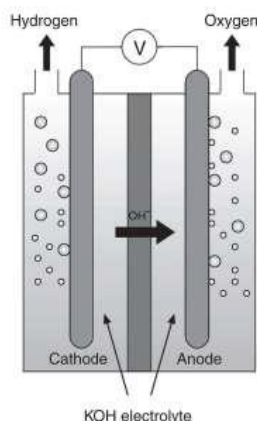
- Un esquema del sistema, el cual dará una idea del funcionamiento viendo el recorrido que siguen los cationes y los aniones.
- Los componentes que se centrará principalmente en los electrodos y sus materiales.
- Las materias primas. Además del agua que se pretende separar en sus elementos pueden ser necesarios aditivos que actúen como catalizador de la reacción.
- Las reacciones que ocurren en el ánodo y en el cátodo.
- Los voltajes de celda necesarios para que se produzca la reacción.

Es la tecnología más madura, y debido a su desarrollo, es la más económica, su eficacia se sitúa en torno al 62-82%, siendo mayor cuanto mayor sea el tamaño del electrolizador. (Chisholm, 2016)

2.6.7.3 Esquema de la celda electrolítica alcalina

El esquema correspondiente a la Figura 2.19 muestra un electrolizador alcalino convencional, que consta de ánodo y cátodo (normalmente de Níquel, Pt, Ti, C) y un separador entre las cámaras de ambos electrodos que es permeable a los iones de hidróxido y a las moléculas de agua. Para operar en un medio alcalino, es decir, básico, se añade un electrolito como el hidróxido de potasio (KOH) hasta tener una disolución con valores cercanos al 30% de KOH (Chisholm, 2016). La función es desplazar la reacción del ánodo hacia la formación de oxígeno. En el cátodo se forman burbujas de hidrógeno y en el ánodo de oxígeno, las cuales son recogidas de manera separada en cada una de las cámaras.

Figura 2.19 Electroizador alcalino

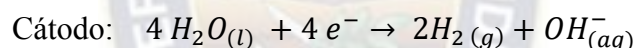
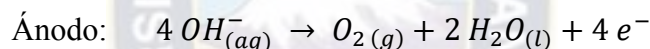


Fuente: (Chisholm, 2016)

2.6.7.4 Materias primas y reacciones químicas

Disolución de agua e hidróxido de potasio al 30%, el cual se puede recuperar y recircular de nuevo al proceso electrolítico.

Reacciones químicas:



2.7 VOLTAMPEROMETRÍA CÍCLICA (VC)

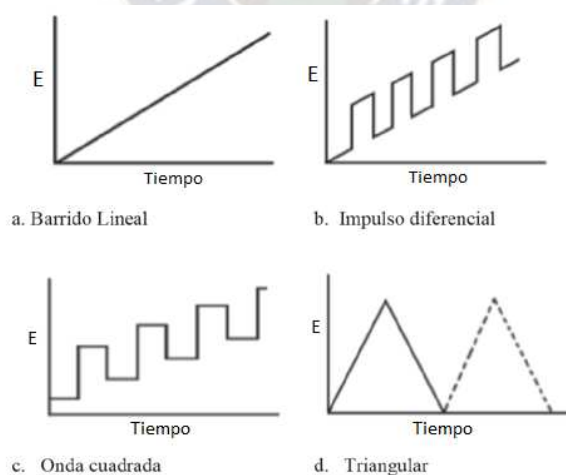
2.7.1 Voltametría Cíclica y Barrido Lineal

De todos los métodos disponibles para estudiar los procesos de electrodos, los métodos de barrido potencial son probablemente los más utilizados. Consisten en la aplicación de un potencial variable continuamente en el tiempo al electrodo de trabajo. Esto da como resultado la ocurrencia de reacciones de oxidación o reducción de especies electroactivas en solución (reacciones farádicas), posiblemente adsorción de especies según el potencial, y una corriente capacitiva debido a la carga de doble capa. Por lo tanto, la corriente observada es diferente de la del estado estacionario ($dc/dt = 0$). La técnica de barrido potencial se utiliza normalmente en electrodos estacionarios, pero también se puede utilizar en electrodos hidrodinámicos. Su uso principal ha sido diagnosticar mecanismos de reacciones electroquímicas, para la identificación de especies presentes en solución y para el análisis semicuantitativo de velocidades de reacción. (Christopher, 1993)

Después de una descripción de cómo controlar el experimento de barrido y sus dos formas, voltametría de barrido lineal (LSV) y voltametría cíclica (CV) (donde la dirección de barrido se invierte a un cierto potencial elegido), se analizara la forma de onda voltamétrica obtenida para reacciones de electrodos lenta y rápida. Finalmente, se presenta el tipo de curva obtenida del barrido lineal en una celda de capa delgada: las celdas de capa delgada son importantes porque permiten una conversión de casi el 100 por ciento de las especies electroactivas y muestran diferencias en relación con el comportamiento electroquímico en una celda de tamaño normal. (Christopher, 1993)

La Figura 2.20a, es la señal voltamperométrica clásica, el barrido lineal, en la que la corriente continua aplicada a la celda, aumenta linealmente en función del tiempo, en las Fig. 2.20b y Fig. 2.20c se muestran dos señales de excitación de impulsos. Las intensidades de corriente se miden a diferentes tiempos durante la vida de estos impulsos. La Fig. 2.20d es una onda de forma triangular, donde el potencial varía entre dos valores, primero aumenta linealmente hasta un potencial determinado, y después disminuye linealmente con una pendiente del mismo valor numérico hasta su valor original. Este proceso se puede repetir numerosas veces, registrándose la intensidad de corriente en función del tiempo. (Harvey, 2022)

Figura 2.20 Señales de excitación en voltamperometría cíclica.



Fuente: (Harvey, 2022)

La voltamperometría cíclica se utiliza normalmente para proporcionar información cualitativa sobre procesos electroquímicos en diversas condiciones y constituye una herramienta importante para el estudio de los mecanismos y de las velocidades de los procesos de oxidación/reducción.

Principalmente se utiliza como herramienta para la determinación de los mecanismos de reacción en los procesos electroquímicos. (Harvey, 2022)

La voltametría se caracteriza por la aplicación de una perturbación de potencial en forma de variación lineal con el tiempo. El registro de la respuesta a la perturbación, la corriente, en función del potencial aplicado se denomina voltagrama, voltamograma o voltamperograma.

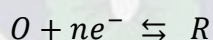
A continuación se resume la teoría voltamétrica para procesos reversibles e irreversibles.

2.7.2 Modelo De Randles – Sevcik para los parámetros de la voltametría cíclica

El tratamiento matemático que proporciona expresiones teóricas que relacionan la corriente de pico, el potencial de pico y otros parámetros experimentales (concentración, velocidad de barrido, temperatura) es similar para ambos procesos. (Bard, 2001)

La diferencia radica en las distintas características cinéticas de los procesos y por tanto, en las condiciones de contorno necesarias para resolver el correspondiente sistema de ecuaciones diferenciales.

Para un proceso reversible - irreversible, las concentraciones de las distintas especies en la superficie del electrodo cumplen la ley de Nernst. Para ello, la velocidad de transferencia electrónica debe ser muy alta. Después de un tratamiento matemático que aparece descrito en cualquier tratado de electroquímica, se obtiene que para un proceso de oxidación-reducción definido como (Bard, 2001):



La corriente presenta un máximo que puede expresarse como:

$$I_p = 0,4463 * \left(\frac{F^3}{RT}\right)^{\frac{1}{2}} * n^{\frac{3}{2}} * A * D^{\frac{1}{2}} * C^* * \nu^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Esta ecuación se conoce como de Randles-Sevcik.

Donde el área (A) viene expresada en (cm²), el coeficiente de difusión de la especie oxidada o reducida (D) en (cm²/s), la concentración en el seno de la disolución de la especie oxidada o reducida (C*) en (mol/cm³), la velocidad de barrido (ν) en (V/s) y la corriente de pico (Ip) en (A), (n) número de electrones involucrados en la reacción.

El potencial de pico viene expresado como:

$$E_p = E_{1/2} - 1,109 \frac{RT}{nF} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Donde el potencial de media onda $E_{1/2}$ se lo expresa de la siguiente manera:

$$E_{1/2} = E^{0'} + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{D_R}{D_O} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuacion 2.15}$$

Donde el potencial formal “ $E^{0'}$ ” viene expresado en (V) este se deberá calcular para la parte catódica y la anódica, es un parámetro muy importante cuando se habla de la ecuación de Nernst, como se encuentra escrita en actividades una forma de esquivar el uso de actividades es conocer el potencial formal “ $E^{0'}$ ”, con ambos potenciales se hallara el potencial del sistema que se está estudiando.

Donde:

E_p = Potencial en el pico, V

$E_{1/2}$ = Potencial de media onda, V

$E^{0'}$ = Potencial formal, V

D_R = Coeficiente de difusión de “R”, cm^2/s

D_O = Coeficiente de difusión de “O”, cm^2/s

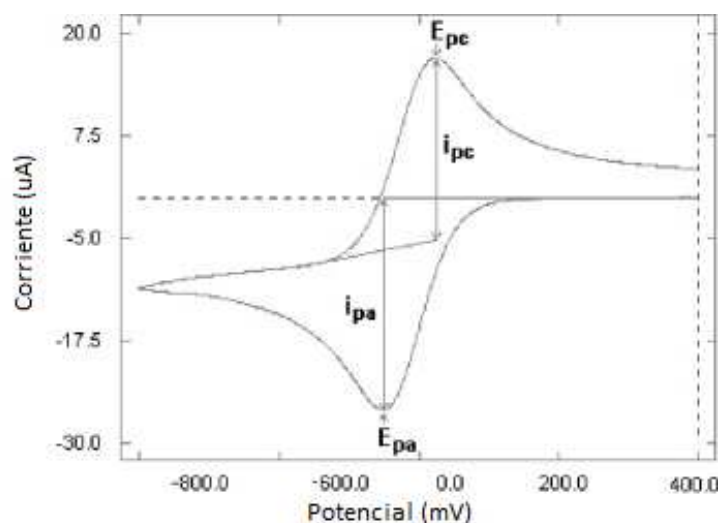
n = número de electrones involucrados

F = constante de Faraday, 96485 C/mol

T = temperatura del sistema, K

R = constante universal de los gases ideales, 8,314 J/molK

Figura 2.21 Voltametría cíclica, típica del ferrocianuro de potasio



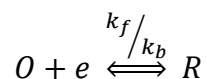
Fuente: (Arrieta, 2012)

2.8 CINÉTICA ELECTROQUÍMICA

2.8.1 Modelo Butler - Volmer de cinética de electrodos

La experiencia demuestra que el potencial de un electrodo afecta fuertemente la cinética de las reacciones que ocurren en su superficie. El hidrógeno evoluciona rápidamente en algunos potenciales, pero no en otros. El cobre se disuelve a partir de una muestra metálica en un rango de potencial claramente definido; sin embargo, el metal es estable fuera de ese rango. Y así es para todos los procesos farádicos. Debido a que la diferencia de potencial interfacial se puede utilizar para controlar la reactividad, queremos ser capaces de predecir la forma precisa en que k_f y k_b dependen del potencial. En esta sección, desarrollaremos un modelo predictivo basado puramente en conceptos clásicos. A pesar de que tiene limitaciones significativas, es muy utilizado en la literatura electroquímica y debe ser entendido por cualquier estudiante del campo. (Bard, 2001)

Consideremos ahora el proceso de electrodo más simple posible, en el que las especies O y R participan en una transferencia de un electrón en la interfaz sin estar involucrados en ningún otro paso químico.



Supongamos también que los perfiles de energía libre estándar a lo largo de la coordenada de reacción tienen las formas parabólicas que se muestran en la Figura 2.22. El marco superior de esa figura representa el camino completo de los reactivos a los productos, mientras que el marco

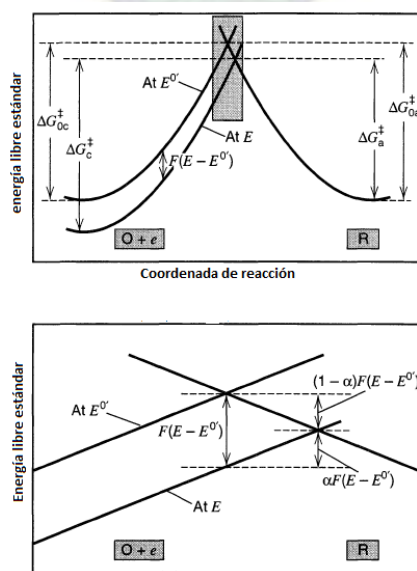
inferior es una ampliación de la región cerca del estado de transición. No es importante para esta discusión que conozcamos las formas de estos perfiles en detalle.

Al desarrollar una teoría de la cinética de los electrodos, es conveniente expresar el potencial contra un punto de importancia para la química del sistema, en lugar de contra una referencia externa arbitraria, como un SCE. Hay dos puntos de referencia naturales, a saber, el potencial de equilibrio del sistema y el potencial estándar (o formal) de la pareja en consideración. De hecho, utilizamos el potencial de equilibrio como punto de referencia en la discusión de la sección anterior, y lo usaremos nuevamente en esta sección.

Sin embargo, es posible hacerlo solo cuando ambos miembros de la pareja están presentes, de modo que se define un equilibrio. El punto de referencia más general es E^0 . Supongamos que la curva superior en el lado O + e de la Figura 2.22 se aplica cuando el potencial del electrodo es igual a E^0 . Las energías de activación catódica y anódica son entonces ΔG_{0c} y ΔG_{0a} respectivamente. (Bard, 2001)

Si el potencial es cambiado por ΔE a un nuevo valor, E, la energía relativa del electrón residente en el electrodo cambia en $-F\Delta E = -F(E - E^0)$; por lo tanto, la curva O + e se mueve hacia arriba o hacia abajo en esa cantidad. La curva inferior en el lado izquierdo de la Figura 2.22 muestra este efecto para un ΔE positivo. Es evidente que la barrera para la oxidación, ΔG_a^* , se ha vuelto menor que ΔG_a por una fracción del cambio total de energía. (Bard, 2001)

Figura 2.22 Efectos del cambio potencial sobre las energías libres de activación para oxidación y reducción.



Fuente: (Bard, 2001)

$1 - \alpha$, donde α , es el coeficiente de transferencia, puede variar de cero a unidad, dependiendo de la forma de la región de intersección. Así:

$$\Delta G_a^+ = \Delta G_{0a}^+ - (1 - \alpha)F(E - E^{0'}) \quad \text{Ecuación 2.16}$$

Un breve estudio de la figura también revela que en el potencial E la barrera catódica, ΔG_c^+ es mayor que ΔG_{0c}^+ por $\alpha F(E - E^0)$; por lo tanto

$$\Delta G_c^+ = \Delta G_{0c}^+ + \alpha F(E - E^{0'}) \quad \text{Ecuación 2.17}$$

Ahora supongamos que las constantes de velocidad k_f y k_b tienen una forma de Arrhenius que se puede expresar como:

$$k_f = A_f \exp\left(-\frac{\Delta G_c^+}{RT}\right) \quad \text{Ecuación 2.18}$$

$$k_b = A_b \exp\left(-\frac{\Delta G_a^+}{RT}\right) \quad \text{Ecuación 2.19}$$

Insertando las energías de activación, 2.18 y 2.19, se obtiene

$$k_f = A_f \exp\left(-\frac{\Delta G_{0c}^+}{RT}\right) \exp[-\alpha f(E - E^{0'})] \quad \text{Ecuación 2.20}$$

$$k_b = A_b \exp\left(-\frac{\Delta G_{0a}^+}{RT}\right) \exp[(1 - \alpha)f(E - E^{0'})] \quad \text{Ecuación 2.21}$$

Dónde: $f = F/RT$. Los dos primeros factores en cada una de estas expresiones forman un producto que es independiente del potencial e igual a la constante de velocidad en $E = E^{0'}$.

Ahora considere el caso especial en el que la interfaz está en equilibrio con una solución en la que $C_O^* = C_R^*$. En esta situación, $E = E^{0'}$ y $k_f C_O^* = k_b C_R^*$, de modo que $k_f = k_b$. Por lo tanto, $E^{0'}$ es el potencial donde las constantes de tasa directa e inversa tienen el mismo valor.

El valor se llama constante de tasa estándar, k^0 , las constantes de velocidad en otros potenciales se pueden expresar simplemente en términos de k^0 :

$$k_f = k^0 \exp[-\alpha f(E - E^{0'})] \quad \text{Ecuación 2.22}$$

$$k_b = k^0 \exp[(1 - \alpha)f(E - E^{0'})] \quad \text{Ecuación 2.23}$$

La intersección de estas relaciones produce la característica completa de corriente-potencial:

$$i = nFAk^0[C_O(0, t)e^{-\alpha n f(E-E^0')} - C_R(0, t)e^{(1-\alpha)n f(E-E^0')}] \quad \text{Ecuación 2.24}$$

Esta relación es muy importante, o una variación derivada de él, se utilizan en el tratamiento de casi todos los problemas que requieren una explicación de cinética heterogénea. Estos resultados y las inferencias derivadas de ellos se conocen ampliamente como la formulación Butler-Volmer de la cinética de electrodos, en honor a los pioneros en esta área.

Se pueden derivar las expresiones cinéticas de Butler-Volmer por un método alternativo basado en potenciales electroquímicos. Tal enfoque puede ser más conveniente para casos más complicados, como requerir la inclusión de efectos de doble capa o secuencias de reacciones en un mecanismo.

2.8.2 El coeficiente de transferencia

El coeficiente de transferencia, α , es una medida de la simetría de la barrera energética. Esta idea puede ampliarse considerando α , en términos de la geometría de la región de intersección, como se muestra en la figura 2.21. Si las curvas son localmente lineales, entonces los ángulos θ y ϕ se definen por (Bard, 2001):

$$\tan\theta = \frac{\alpha FE}{x} \quad \text{Ecuación 2.25}$$

$$\tan\phi = \frac{(1-\alpha)FE}{x} \quad \text{Ecuación 2.26}$$

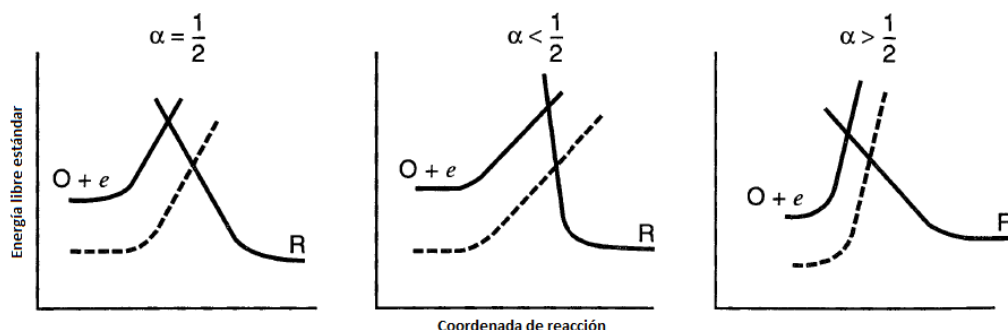
Por lo tanto

$$\alpha = \frac{\tan\theta}{\tan\phi + \tan\theta} \quad \text{Ecuación 2.27}$$

Si la intersección es simétrica, $\phi = \theta$, y $\alpha = 1/2$. De lo contrario, $0 \leq \alpha < 1/2$ o $\frac{1}{2} < \alpha \leq 1$, como se muestra en la figura 2.23. En la mayoría de los sistemas α resulta estar entre 0.3 y 0.7, y generalmente se puede aproximar por 0,5 en ausencia de mediciones reales.

No es probable que los perfiles de energía libre sean lineales en grandes rangos de la coordenada de reacción. Por lo tanto, se puede esperar que los ángulos θ y ϕ a medida que la intersección entre las curvas de reactivos y productos cambia con el potencial. En consecuencia, un debe ser generalmente un factor dependiente del potencial.

Figura 2.23 El coeficiente de transferencia como indicador de la simetría de la barrera a la reacción



Fuente: (Bard, 2001)

Las líneas discontinuas muestran el desplazamiento en la curva para $O + e^-$ a medida que el potencial se hace más positivo. Sin embargo, en la gran mayoría de los experimentos, α parece ser constante, aunque solo sea porque el rango potencial sobre el cual se pueden recopilar datos cinéticos es bastante estrecho. Por lo tanto, el punto de intersección varía solo en un dominio pequeño, como la región en caja en la figura 2.23, donde apenas se puede ver la curvatura en los perfiles. En algunos sistemas, la transferencia de masa no es un problema y la cinética se puede medir en rangos muy amplios de potencial.

2.8.3 Corriente de intercambio

En equilibrio, la corriente neta es cero, y se sabe que el electrodo adopta un potencial basado en las concentraciones aparentes de O y R según lo dictado por la ecuación de Nernst. Ahora si el modelo cinético resulta esa relación termodinámica como un caso especial. De la ecuación 2.23 tenemos, a corriente cero. (Bard, 2001)

$$FAk^0C_O(0,t)e^{-\alpha f(E_{eq}-E^{0'})} = FAk^0C_R(0,t)e^{(1-\alpha)f(E_{eq}-E^{0'})} \quad \text{Ecuación 2.28}$$

Dado que se aplica el equilibrio, las concentraciones aparentes de O y R se encuentran también en la superficie; por lo tanto

$$e^{f(E_{eq}-E^{0'})} = \frac{C_O^*}{C_R^*} \quad \text{Ecuación 2.29}$$

Que es simplemente una forma exponencial de la relación de Nernst:

$$E_{eq} = E^{0'} + \frac{RT}{F} \ln \frac{C_O^*}{C_R^*} \quad \text{Ecuación 2.30}$$

Así, la teoría ha pasado su primera prueba de compatibilidad con la realidad. A pesar de que la corriente neta es cero en equilibrio, todavía imaginamos una actividad farádica equilibrada que puede expresarse en términos de la corriente de intercambio, i_0 , que es igual en magnitud a cualquiera de los componentes de corriente, i_c o i_a . Es decir (Bard, 2001):

$$i_0 = F A k^0 C_O^* e^{-\alpha f (E_{eq} - E^{0'})} \quad \text{Ecuación 2.31}$$

Si ambos lados de la ecuación 2.28 se elevan a la potencia $-\alpha$, obtenemos:

$$e^{-\alpha f (E_{eq} - E^{0'})} = \left(\frac{C_O^*}{C_R^*} \right)^{-\alpha} \quad \text{Ecuación 2.32}$$

La sustitución de la ecuación 2.28 por 2.30 da

$$i_0 = n F A k^0 C_O^{*(1-\alpha)} C_R^{*\alpha} \quad \text{Ecuación 2.33}$$

A menudo, la corriente de intercambio se normaliza al área de la unidad para proporcionar la densidad de corriente de intercambio, $j_0 = i_0/A$.

2.8.4 La ecuación corriente - sobre potencial

Una ventaja de trabajar con i_0 en lugar de k^0 es que la corriente -se puede describir en términos de la desviación del potencial de equilibrio, es decir, el sobre potencial, η , en lugar del potencial formal, $E^{0'}$. Dividiendo ecuación 2.24 por 2.33, obtenemos (Bard, 2001):

$$\frac{i}{i_0} = \frac{C_O(0, t) e^{-\alpha f (E - E^{0'})}}{C_O^{*(1-\alpha)} C_R^{*\alpha}} - \frac{C_R(0, t) e^{(1-\alpha) f (E - E^{0'})}}{C_O^{*(1-\alpha)} C_R^{*\alpha}} \quad \text{Ecuación 2.34}$$

O

$$\frac{i}{i_0} = \frac{C_O(0, t)}{C_O^*} e^{-\alpha f (E - E^{0'})} \left(\frac{C_O^*}{C_R^*} \right)^\alpha - \frac{C_R(0, t)}{C_R^*} e^{-\alpha f (E - E^{0'})} \left(\frac{C_O^*}{C_R^*} \right)^{-(1-\alpha)} \quad \text{Ecuación 2.34}$$

Las relaciones $(C_O^* / C_R^*)^\alpha$ y $(C_O^* / C_R^*)^{-(1-\alpha)}$ se evalúan fácilmente a partir de las ecuaciones 2.28 y 2.29, y por sustitución obtenemos

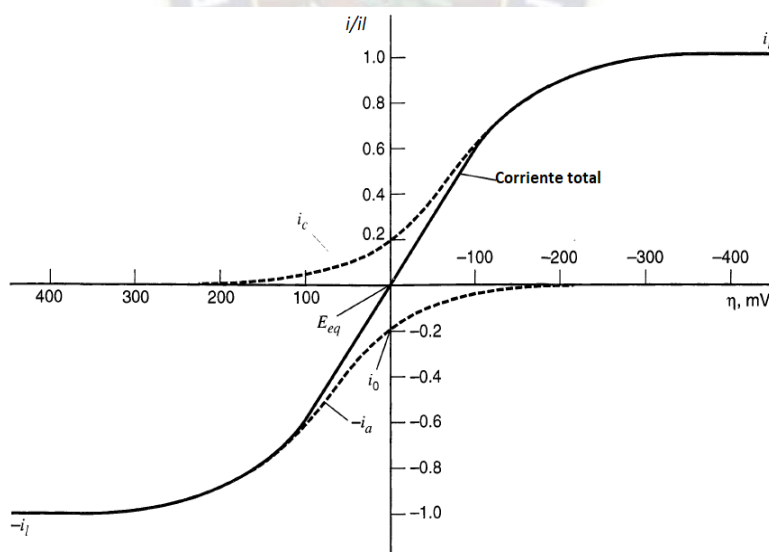
$$i = i_0 \left[\frac{C_O(0, t)}{C_O^*} e^{-\alpha f \eta} - \frac{C_R(0, t)}{C_R^*} e^{-(1-\alpha) f \eta} \right] \quad \text{Ecuación 2.35}$$

Donde $\eta = E - E_{eq}$, esta ecuación, conocida como la ecuación de sobre potencial actual, se utilizará con frecuencia en discusiones posteriores. Nótese que el primer término describe la corriente del componente catódico a cualquier potencial, y el segundo da la contribución anódica.

El comportamiento predicho por la ecuación 2.34 se representa en la figura 2.21 La curva sólida muestra la corriente total real, que es la suma de los componentes i_c y i_a , mostrados como trazas discontinuas. Para grandes sobre potenciales negativos, el componente anódico es insignificante; por lo tanto, la curva de corriente total se fusiona con la de i_c . En grandes sobre potenciales positivos, el componente catódico es insignificante, y la corriente total es esencialmente la misma que i_a . Al ir en cualquier dirección desde E_{eq} , la magnitud de la corriente aumenta rápidamente, porque los factores exponenciales dominan el comportamiento, pero en el extremo η , la corriente se nivela. En estas regiones de nivel, la corriente está limitada por la transferencia de masa en lugar de la cinética heterogénea. Los factores exponenciales en la ecuación 2.35 son moderados por los factores $C_O(0, t)/C_O^*$ y $C_R(0, t)/C_R^*$, que manifiestan el suministro de reactivos.

Figura 2.24 Curvas de sobrepotencial de corriente para el sistema $O + e \leftrightarrow R$ con $\alpha = 0,5$, $T = 298$ K,

$$i_{l,c} = -i_{l,a} = i_l \text{ y } i_0/i_l = 0,2$$



Fuente: (Bard, 2001)

Las líneas discontinuas muestran las corrientes componentes i_c y i_a regiones de nivel, la corriente está limitada por la transferencia de masa en lugar de la cinética heterogénea. Los factores exponenciales en la ecuación 2.35 son moderados por los factores $C_O(0, t)/C_O^*$ y $C_R(0, t)/C_R^*$, que manifiestan el suministro de reactivos.

Si la corriente de intercambio es muy grande, como para el caso (a) en la figura 2.24, entonces el sistema puede suministrar grandes corrientes, incluso la corriente limitada por transferencia de masa, con un sobrepotencial de activación insignificante. En ese caso, cualquier sobrepotencial observado está asociado con concentraciones superficiales cambiantes de las especies O y R. Se llama sobrepotencial de concentración y puede verse como una energía de activación requerida para impulsar la transferencia de masa a la velocidad necesaria para soportar la corriente. Si las concentraciones de O y R son comparables, entonces E_{eq} estará cerca de E , y las corrientes limitantes para los segmentos anódico y catódico se alcanzarán dentro de unas pocas decenas de milivoltios de E^0 . Por otro lado, se podría tratar con un sistema con una corriente de intercambio extremadamente pequeña porque k^0 es muy bajo, como para el caso (b) en la figura 2.24. Las densidades de corriente de intercambio en sistemas reales reflejan el amplio rango en k^0 . Pueden exceder los 10 A/cm^2 o ser inferiores a pA/cm^2 .

2.8.5 Comportamiento de Tafel en gran sobrepotencial " η "

Para valores grandes de η (ya sea negativo o positivo), uno de los términos entre corchetes en (3.6) se vuelve insignificante. Por ejemplo, en grandes sobrepotenciales negativos, $\exp(-\alpha f\eta) \gg \exp[(1-\alpha)f\eta]$ y se convierte en (Bard, 2001):

$$i = i_0 e^{-\alpha f\eta} \quad \text{Ecuación 2.36}$$

En términos logarítmicos, se tiene para la rama catódica:

$$\ln i = \ln i_0 - \frac{\alpha n F}{RT} \eta \quad \text{Ecuación 2.37}$$

Así mismo, para η muy positivos, el término catódico desaparece:

$$i = i_0 [e^{-\alpha n f \eta} - e^{(1-\alpha) n f \eta}] \quad \text{Ecuación 2.38}$$

En términos logarítmicos, se tiene para la rama anódica:

$$\ln i = \ln i_0 + \frac{(1-\alpha)nF}{RT} \eta \quad \text{Ecuación 2.39}$$

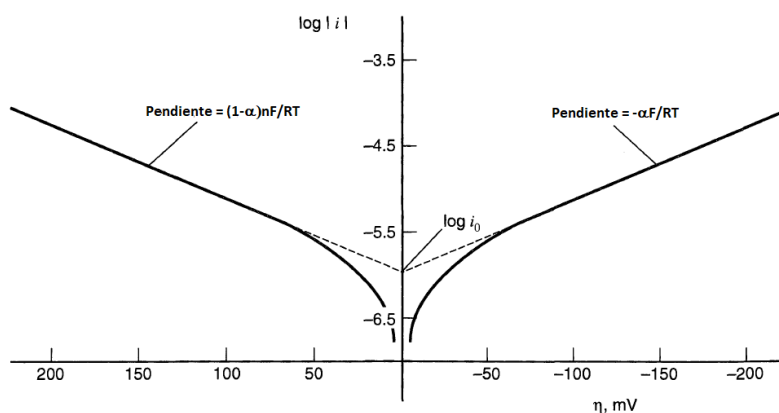
Por lo tanto, encontramos que el tratamiento cinético descrito anteriormente produce una relación de la forma de Tafel, como lo requiere la observación, para las condiciones apropiadas. Las constantes empíricas de Tafel ahora se pueden identificar a partir de la teoría.

Se puede esperar que la forma de Tafel se mantenga siempre que la reacción inversa (es decir, el proceso anódico, cuando se considera una reducción neta, y viceversa) contribuya con menos del 1% de la corriente, lo que implica que $|\eta| > 118 \text{ mV}$ a 25°C . Si la cinética del electrodo es bastante fácil, el sistema se acercará a la corriente limitada por transferencia de masa en el momento en que se establezca un sobrepotencial tan extremo. Las relaciones de Tafel no se pueden observar para tales casos, porque requieren la ausencia de efectos de transferencia de masa sobre la corriente. Cuando la cinética de los electrodos es lenta y se requieren sobrepotenciales de activación significativos, se pueden ver buenas relaciones de Tafel. Este punto subraya el hecho de que el comportamiento de Tafel es un indicador de cinética totalmente irreversible. Los sistemas en esa categoría no permiten un flujo de corriente significativo, excepto a altos sobrepotenciales, donde el proceso farádico es efectivamente unidireccional y, por lo tanto, químicamente irreversible.

2.8.6 Gráficas de Tafel

Un gráfico de $\log i$ vs. η , conocido como gráfico de Tafel, es un dispositivo útil para evaluar parámetros cinéticos. En general, hay una rama anódica con pendiente $(1 - \alpha)nF/RT$ y una rama catódica con pendiente $-\alpha nF/RT$. Como se muestra en la figura 2.23, ambos segmentos lineales se extrapolan a una intersección de $\log i_0$. Las gráficas se desvían bruscamente del comportamiento lineal a medida que η se acerca a cero, porque las reacciones posteriores ya no pueden considerarse insignificantes. El coeficiente de transferencia, α , y la corriente de intercambio, i_0 , son obviamente fácilmente accesibles desde este tipo de presentación, cuando se puede aplicar. (Bard, 2001)

Figura 2.25 Diagramas de Tafel para ramas anódicas y catódicas de la curva de sobrepotencial de corriente para $\text{O} + \text{e} \rightleftharpoons \text{R}$ con $\alpha = 0,5$, $T = 298 \text{ K}$, and $j_0 = 10^{(-6)} \text{ A/cm}^2$



Fuente: (Bard, 2001)

2.9 TRANSPORTE DE MATERIA HACIA EL ELECTRODO

El aporte de reactivo(s) a una superficie electródica y la retirada de producto(s) desde ella son pasos esenciales en un proceso electroquímico. Las técnicas de transporte de materia controlada tal como la voltametría cíclica y la voltametría de barrido lineal se puede utilizar para determinar el coeficiente de difusión de una especie electroactiva. (Walsh, 1999)

2.9.1 Formas de transporte de materia

En el caso general, hay tres contribuciones al transporte de materia, a saber: difusión, convección y migración. Como se indica en la tabla 2.3, estos modos son motivados por un gradiente cerca de la superficie electródica, es decir un cambio gradual con la distancia desde el electrodo.

Tabla 2.3
Modos de transporte de materia

MODO	FUERZA IMPULSORA	NATURALEZA DE LA FUERZA
Difusión	Gradiente de concentración dc/dx	Física
Convección	Gradiente de velocidad dv/dx	Diferencias en densidad (convección natural) o fuerzas mecánicas externas (convección forzada)
Migración	Gradiente de potencial dE/dx	Electrostática

Fuente: (Walsh, 1999)

Dónde: x = distancia perpendicular desde la superficie del electrodo, c = concentración de las especies, v = velocidad características de las especies, E = potencial.

La difusión es el movimiento de una especie bajo un gradiente de concentración y tendrá lugar siempre que exista un cambio en la superficie del electrodo, tal como la conversión de O a R. el resultado de este proceso es una concentración menor de O en la superficie del electrodo (y un nivel de R mayor) que en el seno de la disolución.

2.9.2 Difusión para reacción química heterogénea

Para el estudio de difusión en este proyecto se lo realizará considerando que se tendrá una reacción química heterogénea, esto significa que, la reacción se da cuando el electrodo y el reactivo existen en dos fases distintas, en este caso el electrodo estará en fase sólida y el reactivo en solución.

Aquí de los tres procesos se tomara en cuenta como el más importante la difusión con reacción química heterogénea, es decir, la cantidad que cruza la unidad de area en la unidad de tiempo figura 2.24(a) está definida por la ecuación 2.40 como (Bird, 2002):

$$N = \frac{j}{nF} \quad \text{Ecuación 2.40}$$

Si la difusión es el único modo de transporte de materia, el flujo se puede relacionar al gradiente de concentración de reactivo, dc/dx por la primera ley de Fick como se muestra en la figura 2.24 (b):

$$\frac{j}{nF} = -D \frac{dc}{dx} \quad \text{Ecuación 2.41}$$

$$[\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}] = [\text{m}^2 \text{s}^{-1}] \frac{[\text{mol m}^{-3}]}{[\text{m}]}$$

Donde D es el coeficiente de difusión de la especie que tiene una concentración, c .

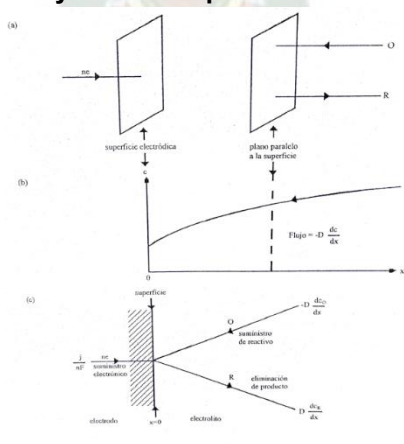
Esta expresión es válida para la difusión lineal a un electrodo plano, es decir, se supone que el electrodo es plano y la concentración varia solo en la dirección perpendicular a la superficie del electrodo.

La ecuación 2.41 se puede reescribir en términos de densidad de corriente para la reacción de reducción en la superficie del electrodo:

$$j = -nFD_o \left(\frac{dc_o}{dx} \right) \quad \text{Ecuación 2.42}$$

En el caso de estado estacionario, los perfiles de concentración son lineales como se muestran en la figura 2.24 (c).

Figura 2.26 Leyes de Fick para la difusión lineal



Fuente: (Walsh, 1999)

En a) difusión de reactivo (O) hacia y del producto (R) desde la superficie electródica, b) concentración frente distancia perpendicular hacia la superficie, c) balance de flujo perpendicular hacia la superficie del electrodo.

Los balances de masa para una o más especies químicas se las realiza sobre una capa delgada de sólido o fluido (Bird, 2002).

Si en la difusión existe un medio B (disolvente) y un compuesto que se difunde A (solute).

Se consideran dos tipos de difusión (Bird, 2002):

- La difusión por convección libre, producida por la diferencia de concentraciones (primera ley de Fick).

$$J_A^* = -D_A C \frac{dx_A}{dx} \quad \text{Ecuación 2.43}$$

- La difusión por convección, producida por el movimiento del fluido.

$$N_A = x_A(N_A + N_B) \quad \text{Ecuación 2.44}$$

Entonces la ecuación para la construcción de los modelos de concentración será:

$$N_A = x_A(N_A + N_B) + J_A^* \quad \text{Ecuación 2.45}$$

La segunda ley de Fick quedara como:

$$N_A = x_A(N_A + N_B) - D_A C \frac{dx_A}{dx} \quad \text{Ecuación 2.46}$$

Por lo tanto, N_A será el flujo combinado, $x_A(N_A+N_B)$ flujo convectivo, $-D_A C(dx_A/dx)$ flujo molecular.

2.10 LEY DE LAS PRESIONES PARCIALES DE GASES

La ley de Dalton establece que “la presión total de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones que cada gas ejercería si estuviera solo”. La aplicación útil de esta ley sera cuando se recoja los gases de H_2 y O_2 sobre agua. (Chang, 2002)

En general, la presión total de una mezcla de gases está dada por:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \dots \quad \text{Ecuación 2.47}$$

Donde P_1, P_2, P_3, \dots son las presiones parciales de los componentes 1, 2, 3,...

La presión ejercida por cada gas, estará de acuerdo con la ecuación del gas ideal:

$$P = \frac{nRT}{V} \quad \text{Ecuación 2.48}$$

Donde P es la presión del gas, n es el número de moles, V es el volumen del gas, R es la constante universal de los gases ideales, T es la temperatura absoluta del gas.

2.11 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental forma parte de procesos científicos de investigación, para optimizar la eficiencia de los resultados de los experimentos se realiza un diseño experimental de acuerdo a las variables y datos a generar, la unidad material del experimento al cual se aplica el experimento, control de las condiciones.

Se trata de controlar aquellas condiciones externas a las unidades experimentales que pueden ocasionar variación o ruido en los resultados del experimento. Para el tratamiento la condición específica del experimento bajo del cual está sujeto la unidad experimental. Es una de las formas que, en cantidad y calidad, el factor a estudiar toma durante el experimento. (MANDEVILLE, 2012)

2.11.1 Diseño Factorial 2^k

Los diseños factoriales se usan ampliamente en experimentos que incluyen varios factores cuando es necesario estudiar el efecto conjunto de los factores sobre una respuesta. Sin embargo, hay varios casos especiales del diseño factorial general que son importantes debido a su uso generalizado en el trabajo de investigación y porque constituyen las bases de otros diseños de gran valor práctico. (Douglas, 1976)

El diseño 2^k es de particular utilidad en las etapas iniciales del trabajo experimental, cuando probablemente se estén investigando muchos factores. Este diseño proporciona el menor número recorridas con las que pueden estudiarse k factores en un diseño factorial completo. Por consiguiente, estos diseños se usan ampliamente en los experimentos de tamizado o selección de factores.

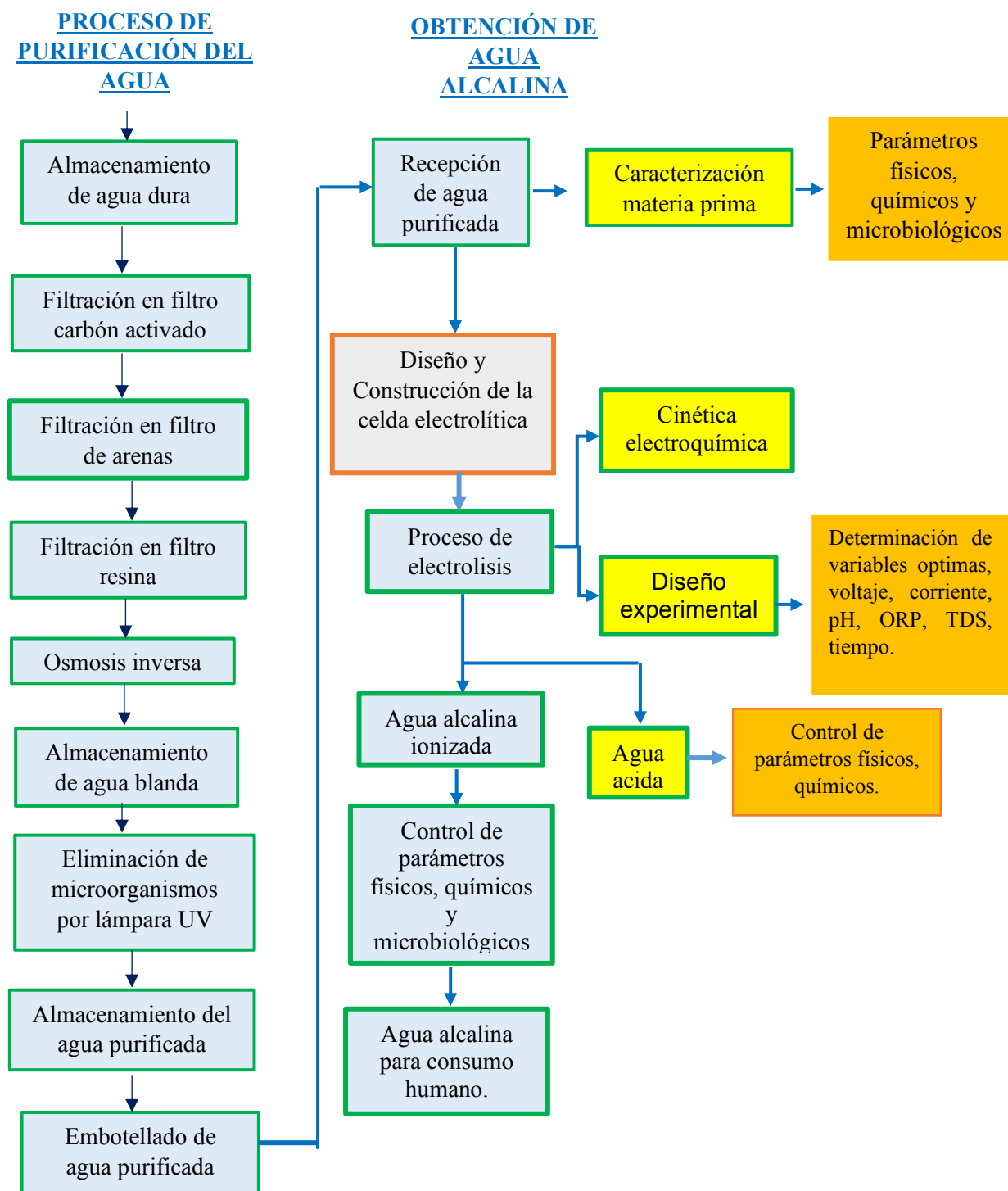


CAPITULO III
METODOLOGIA EXPERIMENTAL

CAPITULO III
METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Figura 3.1 Diagrama de bloques de la fase experimental



Fuente: Elaboración propia

Se llevó a cabo el proyecto de investigación de acuerdo al diagrama de bloques mostrado en la figura 3.1, se comenzó comprendiendo la etapa de purificación del agua por la tecnología de osmosis inversa con una posterior eliminación de microorganismos patógenos no permitidos para el consumo humano. Para el proceso de la electrolisis se comenzó con la recepción y caracterización del agua de osmosis inversa, y los debidos controles de parámetros para la obtención del agua alcalina ionizada.

3.1.1. Instrumentos

3.1.1.1. Materiales

- Material de vidrio: vasos de precipitados, vidrio reloj, pipetas, probetas graduadas, embudos, tubos de ensayo, varilla de vidrio.
- Material de plástico: piseta, propipeta.
- Conector rosca macho 3/8 pulg
- Manguera de silicona de 3/8 de diámetro interno
- Láminas de acrílico
- Papel pH
- Cepillos
- Soportes universales
- Pinzas nuez
- Silicona transparente
- Pernos
- Electrodo de titanio
- Membranas de intercambio catiónico CMI-7000
- Conectores tipo caimán
- Espátula

3.1.1.2. Equipos

- Balanza digital
- pHmetro calibrado (WATERPROOF- pHTestr 30)
- Tester medidor de calidad del agua modelo C-600
- Termómetro digital

- Fuente de poder LODESTAR modelo DC-PS 303TD
- Multímetro digital



3.1.1.3. Reactivos

- Agua destilada
- Cloruro de sodio p.a.
- Soluciones tampón para calibración de pH

3.2. PROCESO DE PURIFICACIÓN DEL AGUA

Para obtener el agua alcalina ionizada, se utilizará como materia prima el agua purificada por el proceso de la osmosis inversa, ya que, se tendrá la caracterización de todos los parámetros de calidad. Por lo tanto en esta sección del proceso de purificación del agua elaborada por la empresa “FLOR DE AGUA UNIKA S.R.L.” será netamente informativa de su proceso de producción.

Tabla 3.1
Proceso de purificación del agua por la empresa “Flor de Agua S.R.L.”

ETAPA	DESCRIPCIÓN
PURIFICACIÓN DEL AGUA	
Almacenamiento de agua dura	<p>En esta etapa se almacena el agua dura de pozo en los tanques de almacenamiento para su posterior tratamiento</p> 
Cloración de agua dura	<p>La cloración de agua es realizada con la finalidad de eliminar los agentes bacterianos presentes en el agua.</p> 

<p>Filtro de cartucho</p>	<p>Hay algunas cosas que las membranas no pueden purificar. Por ejemplo, los nitratos, un contaminante común que se encuentra en los fertilizantes y desechos de animales, son partículas que se disuelven demasiado bien en el agua para que la ósmosis inversa las atrape.</p> 
<p>Filtración en filtro carbón activado</p>	<p>Etapas donde se eliminan las características organolépticas del agua dura tales como color, olor, sabor.</p> 
<p>Filtración en filtro arenas verdes</p>	<p>Diseñado para generar agua libre, es decir, elimina partículas en suspensión de hierro, manganeso y sulfuro de hidrógeno presentes en el agua.</p> 
<p>Filtración en resina</p>	<p>Como principal función tiene la de eliminar sustancias presentes en el agua tales como nitratos, partículas de calcio.</p> 

<p>Almacenamiento de agua blanda</p>	<p>En esta etapa se almacena el agua para su posterior tratamiento.</p> 
<p>Ósmosis inversa</p>	<p>La Ósmosis Inversa es un proceso en el cual se fuerza al agua a pasar a través de una membrana semi-permeable, desde una solución más concentrada en sales disueltas u otros contaminantes a una solución menos concentrada, mediante la aplicación de presión.</p> 
<p>Eliminación de microorganismos por Lámpara UV</p>	<p>Se elimina microorganismos residuales mediante luz uv hasta un 99%, se utiliza como desinfección final.</p> 
<p>Tanque de almacenamiento de agua purificada</p>	<p>El permeado del sistema de purificación OI ira a un tanque grande de almacenamiento para su uso.</p> 

Fuente: Elaboración propia en base a la empresa "Flor de Agua S.R.L"

3.3. PROCESO DE OBTENCION DEL AGUA ALCALINA IONIZADA

3.3.1. Recepción de agua purificada

El agua purificada fue recolectada de la ciudad de El Alto de la empresa “Flor de Agua UNIKA S.R.L.”, esto proveniente del proceso de osmosis inversa y esta servirá como materia prima para el proceso que se tiene como objetivo.

3.3.2. Caracterización de la materia prima

La caracterización de la materia prima o agua de osmosis inversa será analizando y controlando los parámetros de calidad, como ser: físicos, químicos y microbiológicos.

3.3.2.1. pH

Se midió el pH en el Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos – IIDEPROQ, se realizó la validación de la caracterización siguiendo la norma EPA 150.1 de pH electrométrico (Ver más ANEXO B) en el Instituto de Ecología – Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA) dependiente de la facultad de Ciencias Puras y Naturales, se determina el nivel de acidez o alcalinidad utilizando un pH metro.

3.3.2.2. Conductividad eléctrica

Se mide la conductividad de la solución acuosa o agua, con esto el resultado de la medición es el contenido iónico de la solución, lo que permite conocer cuál es su capacidad de conducción eléctrica. Este análisis se realizó en el Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos – IIDEPROQ y se validó siguiendo la norma EPA 120.1 (ANEXO B) en el instituto de Ecología – Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA).

3.3.2.3. Dureza total

Se midió la dureza total para conocer la concentración total de iones de calcio y magnesio en una muestra de agua. Este análisis se validó y caracterizo siguiendo la norma SM 2340 – B (ANEXO B) en el Instituto de Ecología – Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA).

3.3.2.4. Solidos Totales Disueltos

Se determinó los sólidos totales disueltos (TDS) para conocer la cantidad de partículas sólidas solubles presentes en el agua, como ser: concentración de los minerales, sales, cloruros, metales, compuestos orgánicos y muchos otros contaminantes disueltos en el agua. Este análisis de realizo

en el Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos – IIDEPROQ y se realizó la validación de la caracterización siguiendo la norma EPA 160.3 (ANEXO B) en el Instituto de Ecología – Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA).

3.3.2.5. Turbidez

Se determinó la turbidez conocer su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión. En este análisis la validación de la caracterización se lo hizo siguiendo la norma EPA 180.1 (ANEXO B) en el Instituto de Ecología – Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA).

3.3.2.6. Sodio

Se midió la concentración del sodio presente en el agua por la técnica de espectrometría de absorción atómica de llama, para lo cual en este análisis, la validación de la caracterización se lo hizo siguiendo la norma EPA 273.1 (ANEXO B) en el Instituto de Ecología – Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA).

3.3.2.7. Potasio

Se midió la concentración del potasio presente en el agua por espectrometría de absorción atómica de llama, para lo cual en este análisis, la validación de la caracterización se lo hizo siguiendo la norma EPA 258.1 (ANEXO B) en el Instituto de Ecología – Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA).

3.3.2.8. Magnesio

Se determinó la concentración de magnesio por espectrometría de absorción atómica de llama, para lo cual en este análisis, la validación de la caracterización se lo hizo siguiendo la norma EPA 242.1 (ANEXO B) en el Instituto de Ecología – Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA).

3.3.2.9. Calcio

Se midió la concentración del calcio presente en el agua por espectrometría de absorción atómica de llama, para lo cual en este análisis, la validación de la caracterización se lo hizo siguiendo la norma EPA 215.1 (ANEXO B) en el Instituto de Ecología – Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA).

3.3.2.10. Cloruros

Se midió la concentración de cloruros ya que son de los principales aniones inorgánicos en el agua y las aguas residuales, se lo realiza por el método yodométrico que es adecuado para medir concentraciones de cloro total superiores a 1 mg/L en aguas naturales y tratadas. Para este análisis,

la validación de la caracterización se lo hizo siguiendo la norma SM – 4500- Cl-B (ANEXO B) en el Instituto de Ecología – Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA).

3.3.2.11. Bicarbonatos y alcalinidad

Se midió la alcalinidad del agua para determinar la concentración de compuestos solubles en el agua que tienen la habilidad de neutralizar ácidos. Se tiene como el mayor responsable químico de la alcalinidad en el agua a los carbonatos y bicarbonatos disueltos, estos se los realiza por el método de valoración volumétrica, para lo cual en este análisis, la validación de la caracterización se lo hizo siguiendo la norma EPA 310.1 (ANEXO B) en el Instituto de Ecología – Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA).

3.3.2.12. Coliformes totales

Se cuantifico Coliformes en el agua por la técnica de fermentación de tubos múltiples, ya que sirvieron como indicadores de la calidad del agua. Para este análisis, la validación de la caracterización se lo hizo siguiendo la norma SM 9221-E (ANEXO B) en el Instituto (LCA).

3.3.2.13 ORP

El potencial de oxidación y reducción (ORP) es una medida de la eficacia del desinfectante en el agua, en milivoltios (mV), la capacidad de una sustancia química para oxidar o reducir otra sustancia. Para este analisis, la validación de la caracterización se lo realizo con el equipo tester de calidad del agua modelo C-600, en el laboratorio del Instituto de Investigacion de Procesos Químicos (IIDEPROQ).

3.3.3 Diseño y Construcción de la celda electrolítica

Se realizó el diseño de la celda electrolítica de tipo Alcalina, por los siguientes criterios:

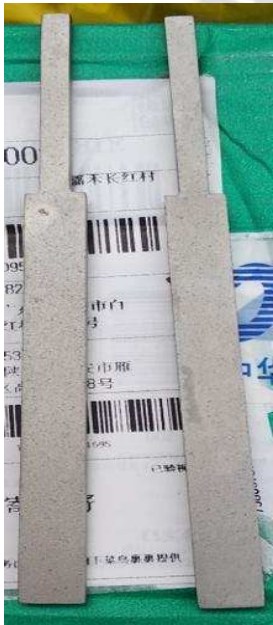

- Actualmente es la tecnología más madura y económica para la electrolisis del agua, en comparación con otras tecnologías como los electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM).
- En la electrolisis del agua su eficacia se incrementa cuanto mayor sea el tamaño del electrolizador.
- Tiene una estructura simple.
- Vida útil elevada.
- La vida útil de las membranas es más duradera.
- Diseño sencillo y económico.

Se realizó el diseño de la celda de tipo “Reactor Batch” por las siguientes consideraciones:

- El porcentaje de conversión es muy elevado por cada unidad de volumen en cada etapa
- Es de construcción muy simple.
- Proceso de limpieza es sencillo.
- La operación se lleva a volumen, temperatura constante.
- Durante la operación del reactor ningún compuesto ingresa o sale del tanque.
- Son utilizados para reacciones de fases líquidas que requieren tiempos de reacción muy prolongados.

Criterios	Características
Material inerte	Acrílico 5 mm de espesor
Forma	Cubica
Volumen total de la celda	1024 mL
Volumen útil	1000 mL
Tipo de membrana	Membrana CMI-7000
Área de la membrana	64 cm ²
Tipo de electrodo	Material Titanio revestido con 1 mm de Pt
Área del electrodo	8 cm ²
Distancia entre electrodos	2 cm

Los electrodos de Ti y membrana CMI-7000 se eligieron por los siguientes criterios:

Electrodo de Ti revestido con Pt	Membrana de Intercambio Catiónico CMI-7000
Alto rendimiento catalítico	Permeoselectividad específica para cationes con carga positiva
Fuerte resistencia a la corrosión - Oxidación	Estabilidad química de pH 1-10
Alta conductividad eléctrica	Área mínima de venta comercial
Con el revestimiento de Pt se tiene alta eficiencia de la corriente	Resistencia eléctrica baja
Vida útil larga y consumo de energía bajo	Densidad de corriente apta para el proceso
Aplicación específica para la electrolisis del agua	Pre acondicionamiento practico
	

Ver más en Anexos A y P.

Se realizó el pre acondicionamiento de la membrana antes de instalarla en la celda, mediante el procedimiento descrito en la ficha técnica de la membrana de intercambio catiónico CMI-7000 (Ver más en Anexo A). El cual consiste realizar la inmersión en un 5% de la solución de NaCl a 40 °C, durante 24 horas para permitir la hidratación de la membrana y su expansión.

Figura 3.2 Cloruro de sodio p.a.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.3 Membrana de Intercambio Catiónico CMI-7000

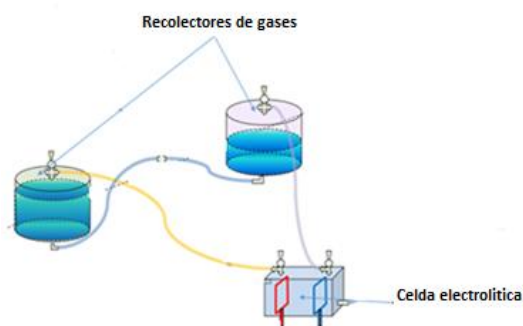


Fuente: Elaboración propia

El sistema estuvo compuesto de 3 elementos:

1. Celda electrolítica
2. Recipiente recolector de gas hidrógeno
3. Recipiente recolector de gas oxígeno

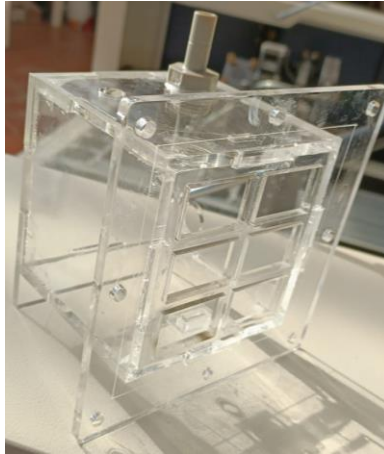
Figura 3.4 Componentes del sistema de electrolisis



Fuente: Elaboración propia

El diseño de planos y medidas de la celda se muestra en el Anexo C. la construcción y montaje del sistema se realizó de la siguiente manera:

Figura 3.5 Parte de la cámara anódica o catódica



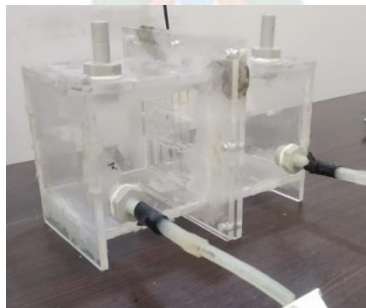
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6 Parte superior de la celda con los conectores rosca



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7 Vista de perfil de la celda



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8 Parte frontal de la celda



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.9 Instalación de la membrana y electrodos



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.10 Montaje final del sistema de producción de agua alcalina ionizada



Fuente: Elaboración propia

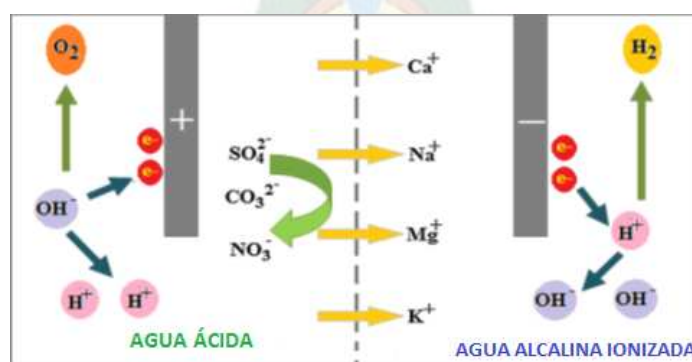
3.3.4 Proceso de la electrolisis

El proceso de producción comenzó luego de realizar la caracterización de parámetros de calidad del agua purificada, se lo utilizo como materia prima y electrolito para alimentar al sistema de la celda electrolítica. Se realizó la alimentación a la cámara anódica y catódica con un volumen de 500 mL, temperatura del sistema de 15°C igual al ambiente aproximadamente, se encendió la fuente de alimentación de CC en la celda, presentado así una diferencia de potencial eléctrico a través de los electrodos.

Por lo tanto, se logró evidenciar en las probetas graduadas cierto desplazamiento del agua contenida en ellas, por los gases producidos en el proceso, en donde en el ánodo se generó iones H^+ e iones OH^- , los iones OH^- pierden electrones positivamente cargados para producir $O_2\uparrow$ conduciendo al aumento de concentración del ion H^+ en la cámara del ánodo, reduciendo así el pH del agua. Las reacciones de reducción cerca del cátodo genero iones H^+ e iones OH^- , los iones H^+ ocuparon los electrones del cátodo cargado negativamente y se produjo $H_2\uparrow$, luego se tuvo acumulación de iones OH^- en cámara del cátodo. Estos iones causaron alcalinidad al agua, el $H_2\uparrow$ evoluciono cerca del cátodo y se disolvió parcialmente en el agua alcalina.

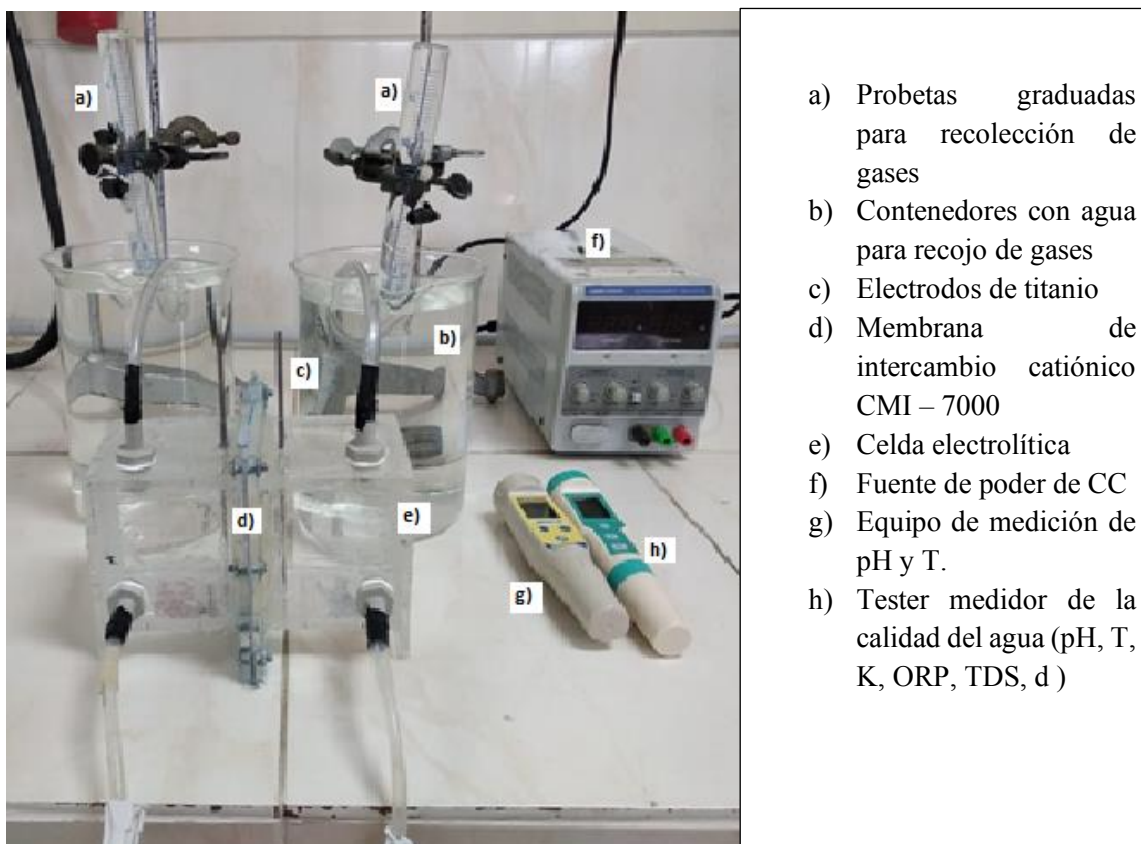
La electrolisis del agua causo un aumento en el pH del agua en la cámara del cátodo y una disminución del pH en el ánodo, la alimentación de la fuente de poder termino hasta que el pH se mantuvo constante, también se tomaron medidas del ORP, a continuación se tiene la figura 3.11 del mecanismo de producción, en donde se evidencia lo que sucedió en el proceso de obtención del agua alcalina ionizada.

Figura 3.11 Mecanismo de producción del agua alcalina ionizada



Fuente: (Vadthya, 2019)

Figura 3.12 Sistema de electrolisis para la produccion del agua alcalina ionizada



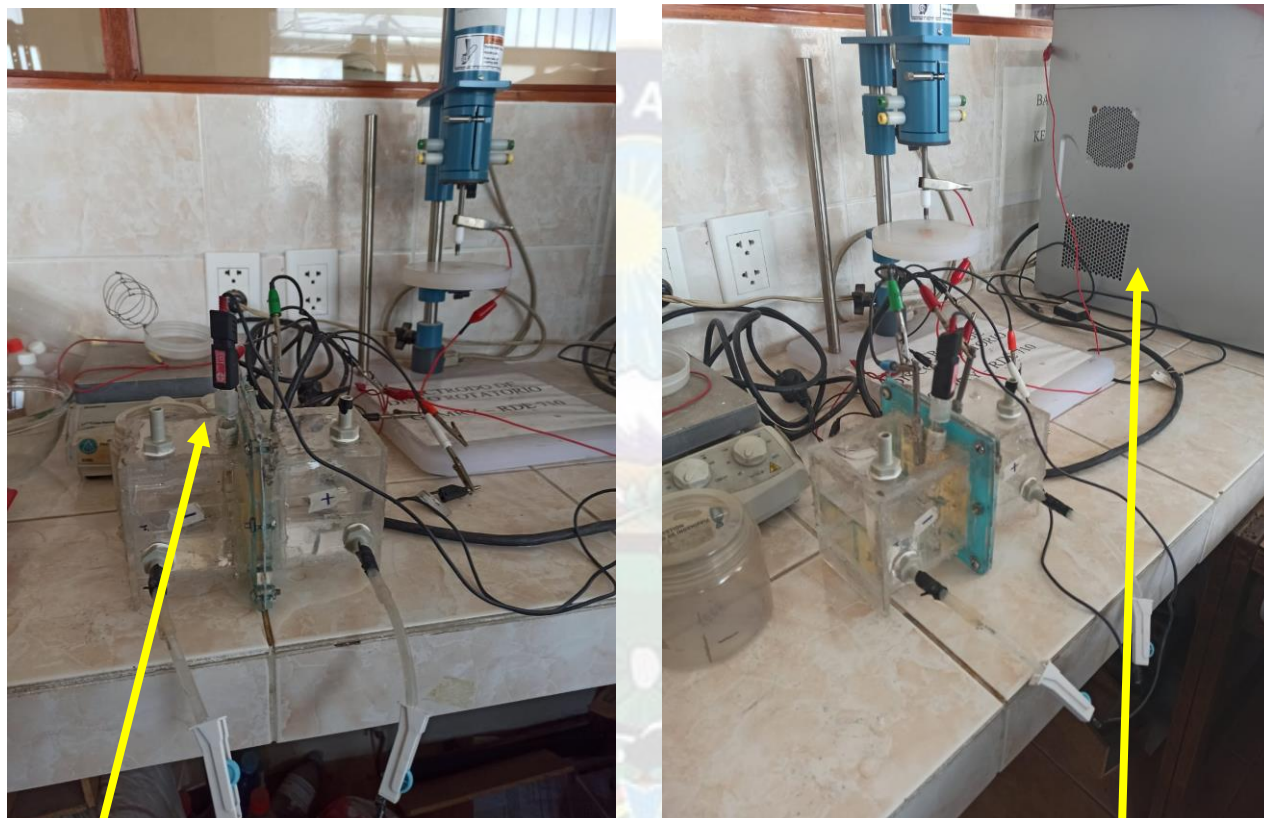
Fuente: Elaboración propia



3.3.5 Cinética electroquímica

Se realizó el estudio cinético, donde se aplicó la técnica electroanalítica “Voltamperometría cíclica” en las instalaciones del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales – IIMETMAT. Se analizó la muestra, con equipos como el potenciostato, electrodo de referencia de Calomel, realizando variaciones de barrido de potencial e intensidad de corriente.

Figura 3.13 Armado del sistema para la voltamperometría cíclica



Electrodo
de
referencia

Fuente: Elaboración propia

Potenciostato

Figura 3.14 Electrodo de referencia de Calomel



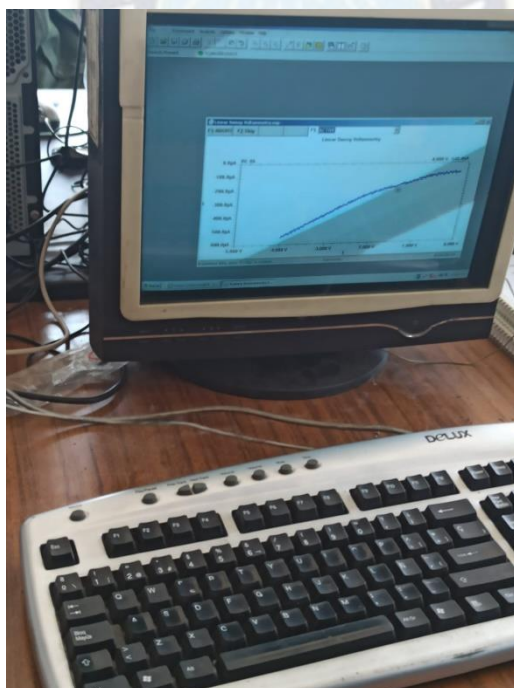
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.15 Potenciostato Gamry



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.16 Vista de los barridos de potencial vs intensidad de corriente



Fuente: Elaboración propia

3.3.6 Diseño experimental


Se realizó el proceso en batch, siendo la masa o volumen de agua en cada cámara de la celda de 500 mL constante, temperatura ambiente. Por lo tanto, para encontrar las mejores condiciones de operación, se realizaran pruebas preliminares en el cual se pueda obtener agua alcalina ionizada durante el proceso de la electrolisis con las debidas características que deberían de presentar para consumo alimenticio. Se identifican las variables o factores más influyentes en el proceso de la electrolisis.

Para el diseño experimental se usó el Programa Design Expert 12, donde se programó los experimentos y el análisis estadístico, con un diseño 2^K .

Tabla 3.2
Factores y respuestas del proceso de electrolisis

Factores	Definición	Unidades	Respuestas	Definición	Unidades
Voltaje	Es el potencial suministrado a la celda electrolítica, aplica do por la fuente de poder de CC.	Voltios (V)	pH	Potencial de hidrogeniones del agua.	
Intensidad de corriente	Corriente eléctrica que circula a través de la solución.	Amperios (A)	ORP	Potencias de oxidación-reducción, es la capacidad de una sustancia química para oxidar o reducir otra sustancia química.	mV
Tiempo	Tiempo del proceso de electrolisis.	Minutos (min)	costos	Es el costo de energía eléctrica utilizada, durante el proceso de producción	Bs

Fuente: Elaboración propia



CAPITULO IV
PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE
RESULTADOS

CAPITULO IV

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

El agua de osmosis inversa se utilizó para el proceso de obtención de agua alcalina ionizada, luego de realizar la estandarización, se obtuvo los siguientes resultados de la caracterización de los parámetros de calidad (Ver más en ANEXO B)

Tabla 4.1

Resultados de los análisis del agua de osmosis inversa del LCA

Parámetro	Unidad	Agua de osmosis inversa
pH		7,6
Calcio	mg/l	3,9
Potasio	mg/l	1,5
Sodio	mg/l	7
Magnesio	mg/l	2,0
Conductividad eléctrica	μS/cm	79
Solidos totales disueltos	mg/l	42
ORP	mV	184
Cloruros	mg Cl/l	3,1
Alcalinidad total	mg CaCO ₃ /l	15
Dureza total	mg CaCO ₃ /l	18
Bicarbonatos	mg/l	14,9
Turbidez	UTN	0,59
Coliformes totales	NMP/100 ml	<2,0

Fuente: Elaboración propia con los resultados del LCA

Según la norma boliviana NB 512: 2016 de Requisitos para el Agua Potable (Ver en ANEXO B, se tienen los siguientes valores establecidos para los diferentes parámetros, el cual no debe ser excedido para no incidir en la salud humana.

Tabla 4.2
Requisitos físicos, químicos y microbiológicos para el agua
Según la norma boliviana NB 512: 2016

Parámetro o característica	Valor máximo aceptable
pH	9,5
Calcio	200,0 mg/l
Potasio	10,0 mg/l
Sodio	200,0 mg/l
Magnesio	150,0 mg/l
Conductividad eléctrica	1500,0 μ S/cm
Solidos totales disueltos	1000 mg/l
Cloruros	250,0 mg/l
Alcalinidad total	370,0 mg/l CaCO ₃
Dureza total	500,0 mg/l CaCO ₃
Bicarbonatos	295,0 mg/l
Turbidez	5 UNT
Coliformes totales	< 2 NMP/100 ml

Fuente: (Agua Requisitos - NB 512, 2016)

Luego de comparar los resultados obtenidos de la caracterización de la materia prima con los requisitos de la norma NB 512: 2016 de agua potable, se verifico que esta es apta para consumo humano y que cumple con lo establecido en la presente norma. Por lo tanto, se dio por aceptado el uso del agua de osmosis inversa para el proceso de obtención de agua alcalina ionizada.

4.2. CÁLCULOS DE LOS PARÁMETROS ELECTROQUÍMICOS INICIALES

De acuerdo a las ecuaciones 2.10 y 2.11 el potencial que se aplicó inicialmente al proceso y resistencia de la celda fue:

$$E_{celda} = E_{rev}^0 + \sum \eta_{sobrepotencial} + I * R_{celda} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

$$R_{celda} = R_{conectores} + R_{anodo} + R_{catodo} + R_{electrolito} + R_{membrana} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Se realizó los cálculos y toma de datos correspondientes (Ver en ANEXO E) donde se tuvieron los siguientes valores de resistencia y voltaje:

Tabla 4.3 Valores de E_{celda} y R_{celda}

$R_{\text{conectores}}$ (ohm)	R_{membrana} (ohm)	$R_{\text{ánodo}}$ (ohm)	$R_{\text{cátodo}}$ (ohm)	$R_{\text{electrolito}}$ (ohm)	R_{celda} (ohm)
2,4	0,47	4,3	4,4	395,6	407,2

Fuente: Elaboración propia

La intensidad mínima que se pudo aplicar al proceso con la fuente de poder CC fue de 0,01 A, con la ecuación de E_{celda} , se calculó el potencial mínimo para empezar con la electrolisis, el potencial estándar teórico mediante la ecuación de Nernst E^0_{rev}

Tabla 4.4

E_{celda} mínimo que se debe aplicar para que ocurra la electrolisis

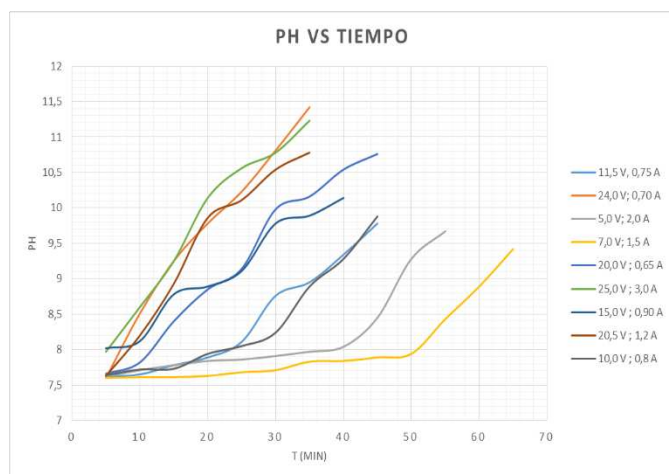
E^0_{rev} (V)	$\sum \eta$ (V)	IR_{celda} (V)	E_{celda} (V)
1,48	1,22	4,07	6,77

Fuente: Elaboración propia

4.3. DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS DURANTE LA OBTENCION DEL AGUA ALCALINA IONIZADA

Durante la experimentación se realizaron distintas pruebas preliminares aleatorias, donde se hizo variaciones de potencial de voltaje “V”, intensidad de corriente “I”, tiempo “t”, los cuales se tuvieron como respuestas el pH, k (conductividad), TDS, ORP. (Ver datos en ANEXO F)

Figura 4.1 Curvas pH vs tiempo “t”



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.2 Curvas ORP vs tiempo “t”

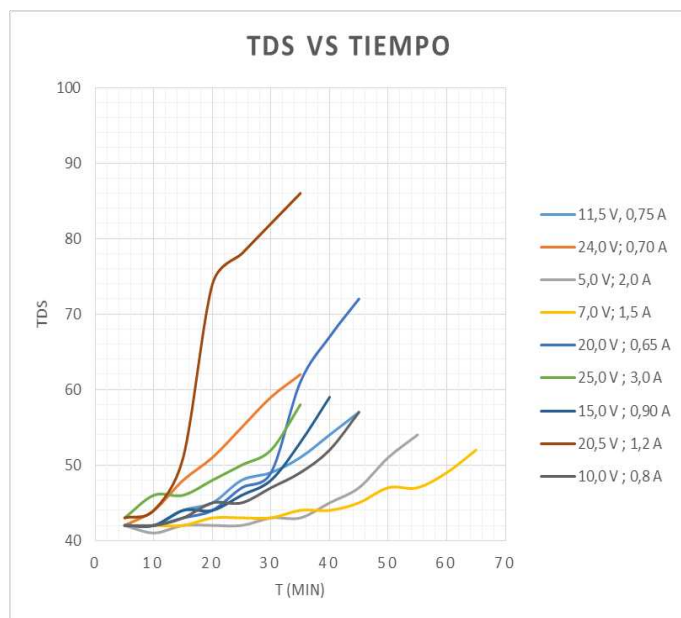


Fuente: Elaboración propia

En las curvas de pH vs Tiempo se evidencio el comportamiento que se tiene al realizar variaciones de potencial (V) e intensidad de corriente (I), en donde se tiene el aumento de pH en el rango de

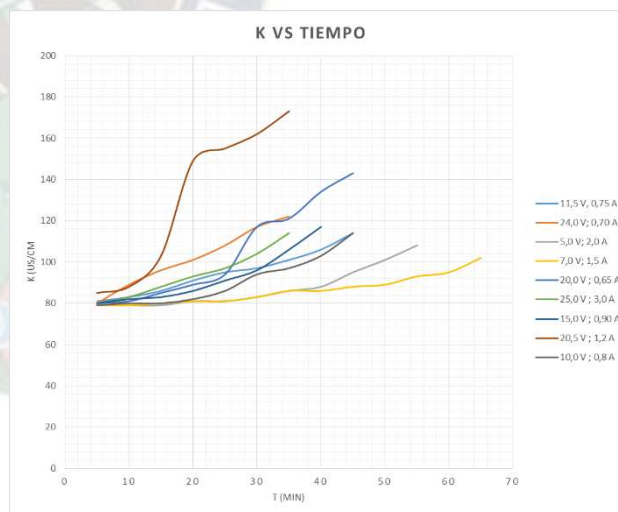
10 a 30 min, incrementando el potencial y la corriente, obteniendo así los parámetros característicos del agua alcalina.

Figura 4.3 Curvas TDS vs tiempo “t”



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.4 Curvas de conductividad eléctrica “k” vs t



Fuente: Elaboración propia

De las curvas de TDS vs t, se logró identificar, que a mayor potencial aplicado hay mayor enriquecimiento de cationes, de la zona anódica a la catódica, se pudo analizar que aplicando 20,5 V y 1,2 A, se tiene un enriquecimiento alto y rápido.

Así mismo, de las curvas k vs t se logró identificar que a medida que sucede el enriquecimiento de cationes, hay aumento de conductividad, por ende se mejora la eficiencia de la corriente.

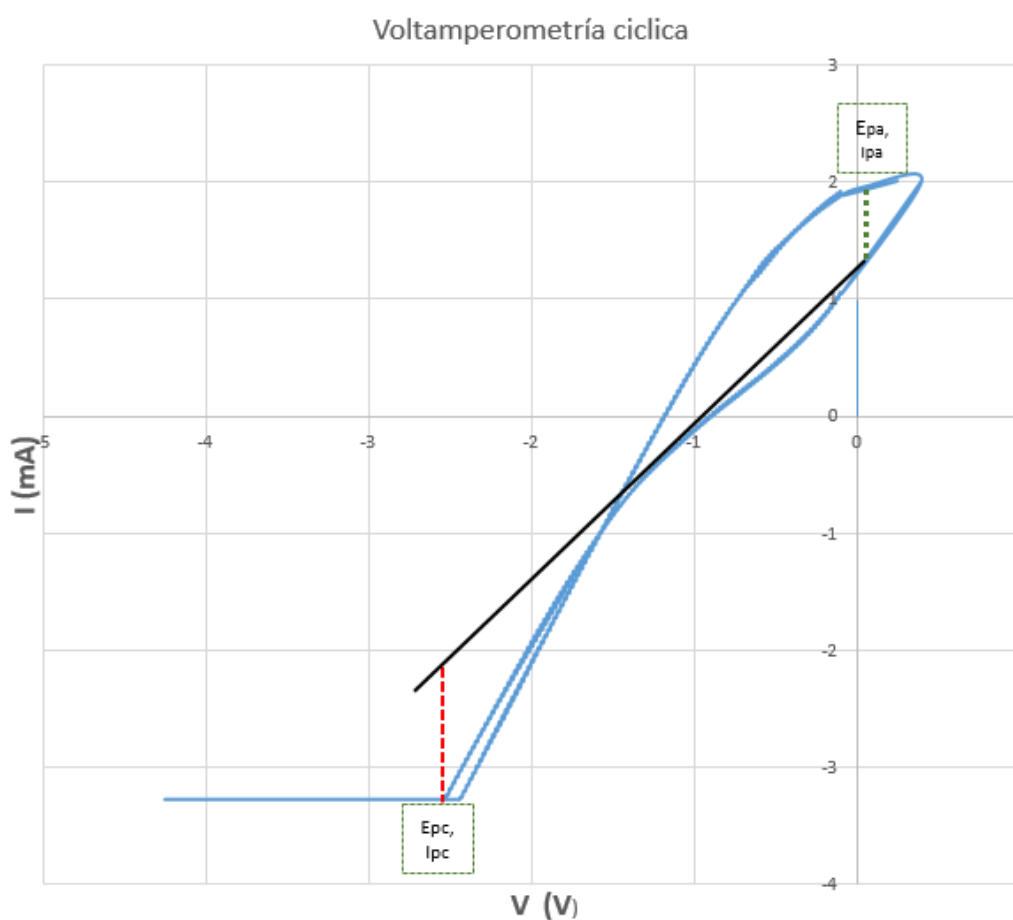
4.4 DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA ELECTROQUÍMICA

4.4.1 Aplicación de la voltamperometría cíclica

Mediante la voltamperometría cíclica se realizó el análisis a una muestra del producto final obtenido, mediante barridos de potencial versus corriente, los datos de los barridos se muestran en ANEXO K.

Se realizó los siguientes análisis a los datos obtenidos de los barridos, así obtener los parámetros para el estudio de la electrolisis del proyecto.

Figura 4.5 Voltamperograma cíclico a la velocidad de barrido de 5 mV/s



Fuente: Elaboración propia

En la parte superior del voltamperograma se encuentra la zona anódica y en la parte inferior la zona catódica, por lo tanto, se realizan los siguientes cálculos de parámetros de estudio.

- Cálculo del coeficiente de difusión de la zona anódica y catódica

Tabla 4.5
Resultados de la parte anódica y catódica del voltograma

	anodico	catodico
$i_p(\text{cm})$	1,1000	2,1300
$i_p(\text{mA})$	0,5978	1,1576
$E_p(\text{V})$	0,1500	-2,5500
Distancia(mA/cm)	0,5435	

Fuente: Elaboración propia

La corriente en el pico, está dada por:

$$i_{pa} = 0,4463 \left(\frac{F^3}{RT} \right)^{\frac{1}{2}} n^{\frac{3}{2}} A D_o^{\frac{1}{2}} C_o v^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Donde:

n = Número de e^- involucrados, eq/mol

A = Área del electrodo, cm^2

D_o = Coeficiente de difusión de "O", cm^2/s

C_o = Concentración de "O" en la solución, mol/cm^3

v = Velocidad de barrido, V/s

R = constante universal de los gases ideales, $8,314 \text{ J}/\text{molK}$

T = temperatura del sistema, 288 K

- Cálculo del coeficiente de difusión de la zona anódica

En la ecuación de corriente en el pico:

$$0,5978 \times 10^{-3} = 0,4463 \left(\frac{96485^3}{8,314 \times 288} \right)^{\frac{1}{2}} \times 4^{\frac{3}{2}} \times 8 \times D_o^{\frac{1}{2}} \times 10^{-7,4} \times 0,2^{\frac{1}{2}}$$

El coeficiente de difusión D_o (oxidación) resulta:

$$D_o = 3,69 \times 10^{-6} \text{ [cm}^2/\text{s]}$$

- Calculo del coeficiente de difusión de la zona catódica

La corriente en el pico, está dada por:

$$i_{pc} = 0,4463 \left(\frac{F^3}{RT} \right)^{\frac{1}{2}} n^{\frac{3}{2}} A D_R^{\frac{1}{2}} C_R v^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Donde:

N = Número de e⁻ involucrados, eq/mol

A = Área del electrodo, cm²

D_R = Coeficiente de difusión de “R”, cm²/s

C_R = Concentración de “R” en la solución, mol/cm³

v = velocidad de barrido, V/s

$$1,133 \times 10^{-6} = 0,4463 \left(\frac{96485^3}{8,314 \times 288} \right)^{\frac{1}{2}} \times 4^{\frac{3}{2}} \times 8 \times D_o^{\frac{1}{2}} \times 10^{-12,6} \times 0,2^{\frac{1}{2}}$$

El coeficiente de difusión D_R (reducción) resulta:

$$D_R = 3,48 \cdot 10^{-5} \text{ [cm}^2\text{/s]}$$

- Calculo del potencial formal para la zona catódica

Calculando el potencial de media onda

$$E_p = E_{1/2} - 1,109 \frac{RT}{nF} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

$$E_{1/2} = E^{0'} + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{D_R}{D_o} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

Donde:

E_p = Potencial en el pico, V

E_{1/2} = Potencial de media onda, V

E^{0'} = Potencial formal, V

D_R = Coeficiente de difusión de “R”, cm²/s

D_O = Coeficiente de difusión de “O”, cm^2/s

$$-2,55 = E_{1/2} - 1,109 \frac{8,314 \times 288}{4 \times 96485}$$

$$E_{1/2} = -2,54 \text{ V}$$

Con la ecuación de potencial de media onda, se tiene:

$$-2,54 = E^{0'} + \frac{8,314 \times 288}{4 \times 96485} \ln \left(\frac{3,48 * 10^{-5}}{3,69 * 10^{-6}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$E^{0'} (\text{catodo}) = -2,55 \text{ V}$$

- Calculo del potencial formal para la zona anódica

Calculando el potencial de media onda

$$E_p = E_{1/2} - 1,109 \frac{RT}{nF} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

$$E_{1/2} = E^{0'} + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{D_R}{D_O} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

Donde:

E_p = Potencial en el pico, V

$E_{1/2}$ = Potencial de media onda, V

$E^{0'}$ = Potencial formal, V

D_R = Coeficiente de difusión de “R”, cm^2/s

D_O = Coeficiente de difusión de “O”, cm^2/s

$$0,15 = E_{1/2} - 1,109 \frac{8,314 \times 288}{4 \times 96485}$$

$$E_{1/2} = 0,16 \text{ V}$$

Con la ecuación de potencial de media onda, se tiene:

$$0,16 = E^{0'} + \frac{8,314 \times 288}{4 \times 96485} \ln \left(\frac{3,48 \times 10^{-5}}{3,69 \times 10^{-6}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$E^{0'} = 0,15 \text{ V}$$

- Cálculo del potencial formal del sistema

$$E^{0'} = E^{0'}(\text{cátodo}) - E^{0'}(\text{ánodo})$$

$$E^{0'} = -2,7 \text{ V}$$

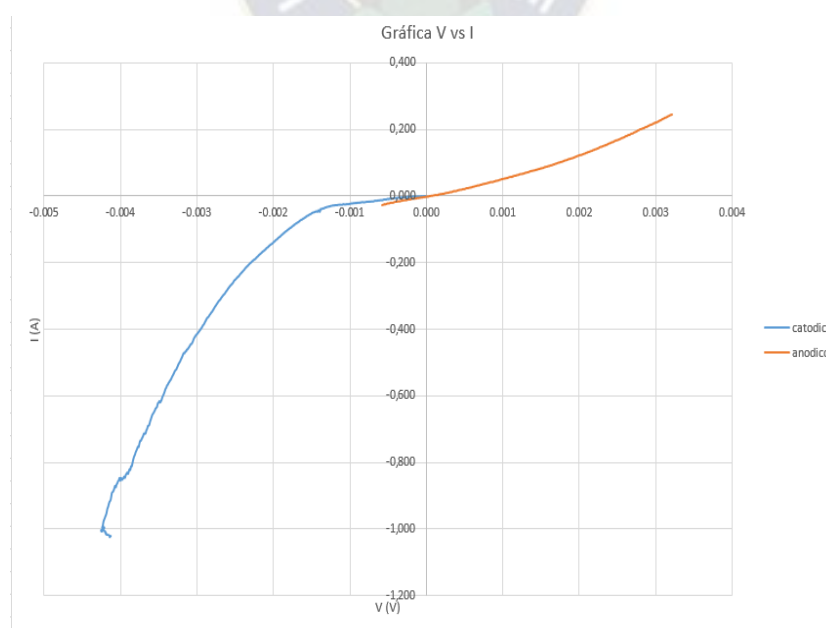
El potencial formal hallado fue el potencial en equilibrio de la electrolisis del agua alcalina, por lo tanto, este es el que reemplace al potencial en equilibrio de la ecuación de Nernst.

4.4.2 Aplicación del modelo de Butler – Volmer y Tafel para la cinética electroquímica

Otra aplicación muy importante que ayudo a la determinación de la cinética es la voltamperometría de barrido lineal, que se realizó tanto para la zona anódica como la catódica, esto fue útil para el modelo de Butler – Volmer y Tafel. Se realizó el análisis de una muestra del producto obtenido, mediante barridos de potencial versus corriente, los datos de barrido (Ver más ANEXO K).

Se realizó los siguientes análisis a los datos obtenidos de los barridos, para así obtener los parámetros cinéticos.

Figura 4.6 Barridos de potencial versus corriente por la voltamperometría de barrido lineal



Fuente: Elaboración propia

- Modelo de Butler – Volmer, ecuación corriente – potencial

La ecuación de corriente - potencial es muy importante, ya que se aplica en el tratamiento de prácticamente de todos los problemas que requieren tomar en cuenta la cinética electroquímica.

La ecuación 2.24 es la ecuación de i vs E :

$$i = nFAk^0[C_O(0,t)e^{-\alpha n f(E-E^0')} - C_R(0,t)e^{(1-\alpha)n f(E-E^0')}] \quad \text{Ecuación 2.24}$$

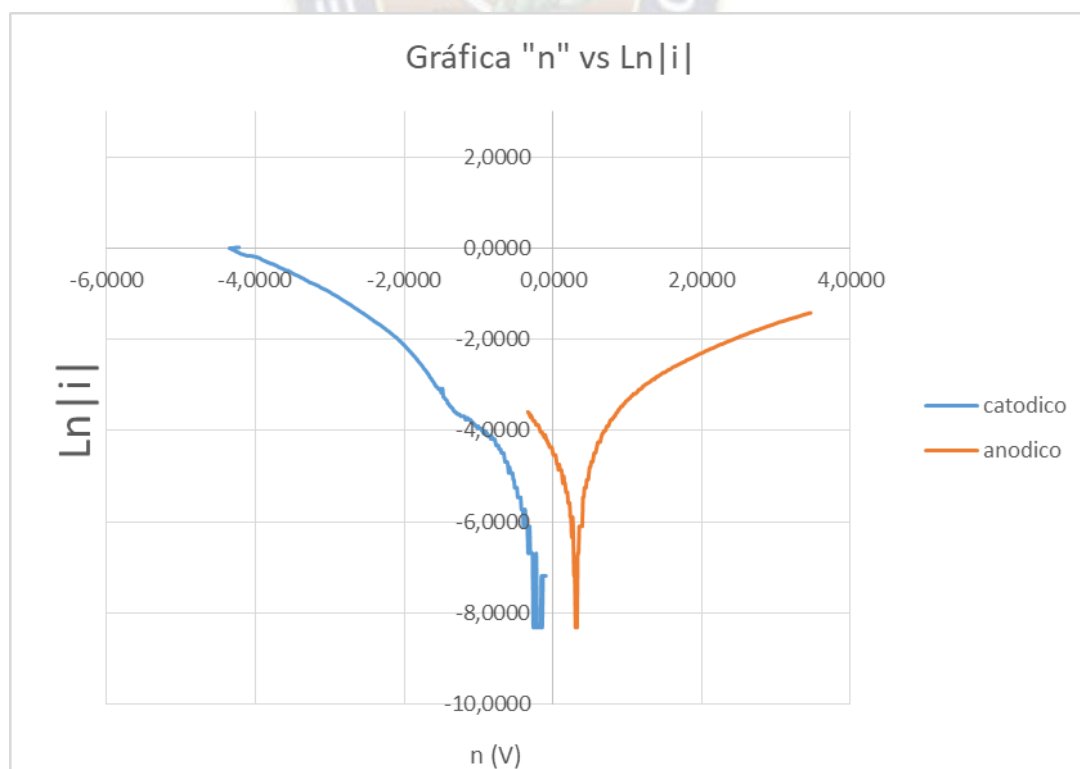
- Calculo de parámetros cinéticos con la ecuación de Tafel

De acuerdo a los datos obtenidos de la figura 4.17, para llegar a Tafel se realizó con los mismos teniendo ahora los ejes de coordenadas “ η ” que fueron el sobre potencial y $\text{Ln}|i|$ logaritmo de la corriente.

Y que: $\eta = E - E_{eq}$

El E_{eq} se identificó mediante la figura 4.7, donde se halló el potencial a una corriente igual a cero, y también de los datos de barrido hallando el valor de corriente más bajo se halló el potencial de E_{eq} .

Figura 4.7 Grafica de Tafel “ η ” vs “ $\text{Ln}|i|$ ”



Fuente: Elaboración propia

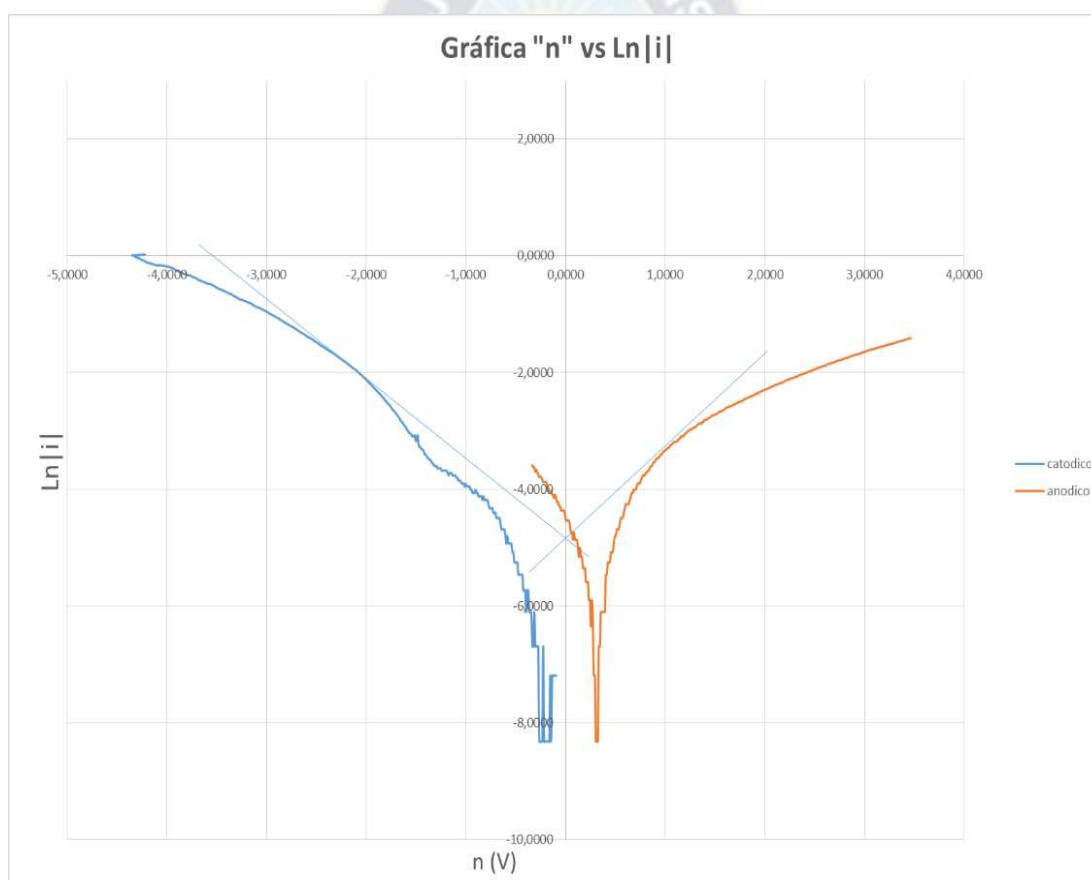
Las ecuaciones 2.38 y 2.40 son las ecuaciones de Tafel, para la rama catódica como para la rama anódica respectivamente.

$$\ln i = \ln i_0 - \frac{\alpha n F}{RT} \eta \quad \text{Ecuación 2.37}$$

$$\ln i = \ln i_0 + \frac{(1 - \alpha) n F}{RT} \eta \quad \text{Ecuación 2.39}$$

Con las dos ecuaciones se realizó la construcción de dos rectas que fueron tangente a la curva, tomando en cuenta la condición de Tafel de $|\eta| > 118 \text{ mV}$, resulto la siguiente grafica con las rectas de Tafel halladas.

Figura 4.8 Curvas de Tafel mediante la regresión lineal



Fuente: Elaboración propia

Para la rama catódica se realizó una regresión lineal de datos, los diferentes cálculos realizados se muestran en el ANEXO L, los datos de la regresión resultaron:

$$r = 0,9989$$

$$b = -4,6432 = \ln(i_0)$$

$$m = -1,3333 = -\alpha nF/RT$$

$$i_o = 0,0096A$$

$$\alpha = 0,76$$

Para la rama anódica se realizó una regresión lineal de los datos, los diferentes cálculos realizados se muestran en el ANEXO L, los datos de la regresión resultaron:

$$r=0,9619$$

$$b = -4,8369 = \ln(i_o)$$

$$m = 2,0166 = (1-\alpha)nF/RT$$

$$i_o = 0,0079A$$

$$\alpha = 0,76$$

La ecuación 2.33 es de la corriente de intercambio, esto se utilizó para hallar la constante cinética k^0 .

$$i_o = nFAk^0 C_O^{(1-\alpha)} C_R^{\alpha} \quad \text{Ecuación 2.33}$$

Mediante los datos de la rama catódica:

$$n = 4, A = 64 \text{ cm}^2, \alpha = 0,76, C_O = 10^{-9},4 \text{ mM}, C_R = 10^{-10},6 \text{ mM}$$

$$F = 96485 \text{ C/mol} \quad i_o = 0,0096 \text{ A}$$

La constante cinética resulto:

$$k^0 = 1,49 * 10^{-6} \text{ cm /s}$$

Por lo tanto, reemplazando todos los parámetros calculados en la ecuación 2.24

$$i = nFAk^0 [C_O(0, t)e^{-\alpha n f(E-E^0')} - C_R(0, t)e^{(1-\alpha)n f(E-E^0')}] \quad \text{Ecuacion 2.24}$$

$$i = 4 * 96485 * 64 * 1,49 * 10^{-6} * \left[C_O(0, t) * e^{\frac{-0,76*4*96485}{8,314*T}(E-(-2,7))} - C_R(0, t) * e^{\frac{(1-0,76)*4*96485}{8,314*T}(E-(-2,7))} \right]$$

La ecuación cinética del proceso de la electrolisis fue:

$$i = 36,803 * e^{-\frac{8819,89}{T}(E+2,7)} * \left[C_{O(0,t)} - C_{R(0,t)} * e^{\frac{46420,49}{T}(E+2,7)} \right] \quad [A]$$

Donde:

- i : corriente del electrodo, A
- $C_{R(0,t)}$: Concentración inicial de “R” en la solución, mM
- $C_{O(0,t)}$: Concentración inicial de “O” en la solución, mM
- E : potencial de electrodo, V
- f : F/RT
- $E^{\theta'}$: potencial formal del electrodo, V
- T : temperatura absoluta, K
- n : número de electrones implicados en la reacción electródica
- F : constante de Faraday
- α : coeficiente de transferencia de carga catódico-anódico, adimensional
- R : Constante universal de los gases, 8,314 J/mol*K
- A : Área del electrodo, cm²

4.5. DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES QUE INFLUYERON EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DEL AGUA ALCALINA IONIZADA

Para la determinación de los factores, estos fueron analizados de la siguiente manera: el tiempo de duración del proceso, potencial de voltaje aplicado y la intensidad de corriente.

Tabla 4.6

Tabla de los factores del proceso

Factores	Efectos	Min.	Máx.
Tiempo (min)	A	20	30
Voltaje (V)	B	5	24
Intensidad (A)	C	0,5	1

Fuente: Elaboración propia con Design Expert 12

Se ha considerado 3 respuestas las cuales son: pH, ORP, y el costo del proceso en Bs.

Para este estudio se utilizó el diseño factorial 2^K siendo K la cantidad de factores a analizarse en 2 niveles cada uno.

Se realizaron 8 tratamientos diferentes más una réplica, por lo cual se realizó 16 tratamientos con los cuales se estudiaron los efectos principales A, B, C; tres interacciones dobles AB, AC, BC y una interacción triple ABC.

4.5.1. Respuestas del diseño experimental

El diseño experimental programado en Design Expert versión 12 se muestra en la tabla 4.5, en la cual las corridas estuvieron configuradas de forma aleatoria, y se procedió a rellenar la tabla con las respuestas obtenidas de pH, ORP, costo; realizando un total de 16 ensayos. (Ver más en ANEXO G)

Tabla 4.5
Respuestas del diseño experimental

Std	Orden Corrida	Tiempo (min)	Voltaje (V)	Intensidad (A)	pH	C.E. (uS)	ORP (mV)	costo x10 ⁻³ (Bs)
1	1	20	5	0,5	7,6	79	181	6,658
11	2	30	5	1	7,9	84	176	19,975
14	3	20	24	1	10,4	117	-228	63,920
5	4	20	24	0,5	8,6	91	-58	31,960
9	5	20	5	1	7,8	82	182	13,317
3	6	30	5	0,5	7,6	81	177	9,988
6	7	20	24	0,5	8,8	92	-61	31,960
13	8	20	24	1	10,5	138	-235	63,920
16	9	30	24	1	10,7	111	-224	95,880
12	10	30	5	1	7,9	84	178	19,975
7	11	30	24	0,5	9,4	98	-185	47,940
8	12	30	24	0,5	9,3	101	-164	47,940
15	13	30	24	1	10,8	142	-268	95,880
2	14	20	5	0,5	7,6	79	103	6,658

10	15	20	5	1	7,7	83	184	13,317
4	16	30	5	0,5	7,6	80	182	9,988

Fuente: Elaboración propia con Design Expert 12

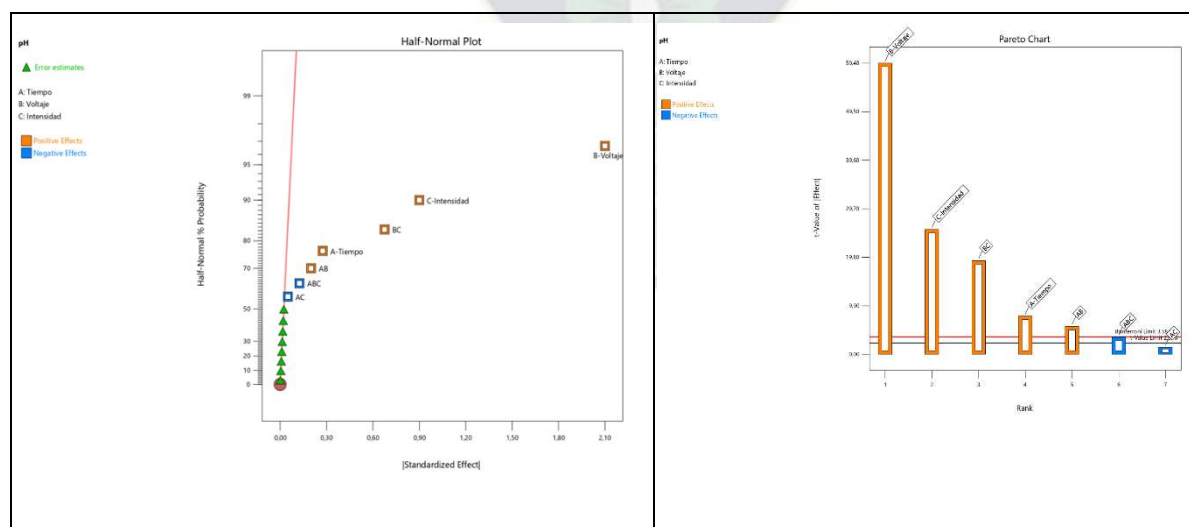
Con estos resultados obtenidos, se realizaron los siguientes análisis estadísticos para tener una mejor visión de los factores que influyen en el proceso de la electrolisis y así obtener las mejores condiciones de operación.

4.5.2. Resultados de Análisis ANOVA del diseño experimental

En el ANEXO G se muestran los resultados del análisis ANOVA dando como resultado que los factores más relevantes, y son:

- B: Voltaje
- C: Intensidad de corriente
- BC: interacción entre el voltaje y la corriente

Sin embargo, cabe mencionar que la gráfica media normal muestra los factores que fueron significativos e importantes, los cuales fueron los efectos principales o la interacción entre dos o más de estos.



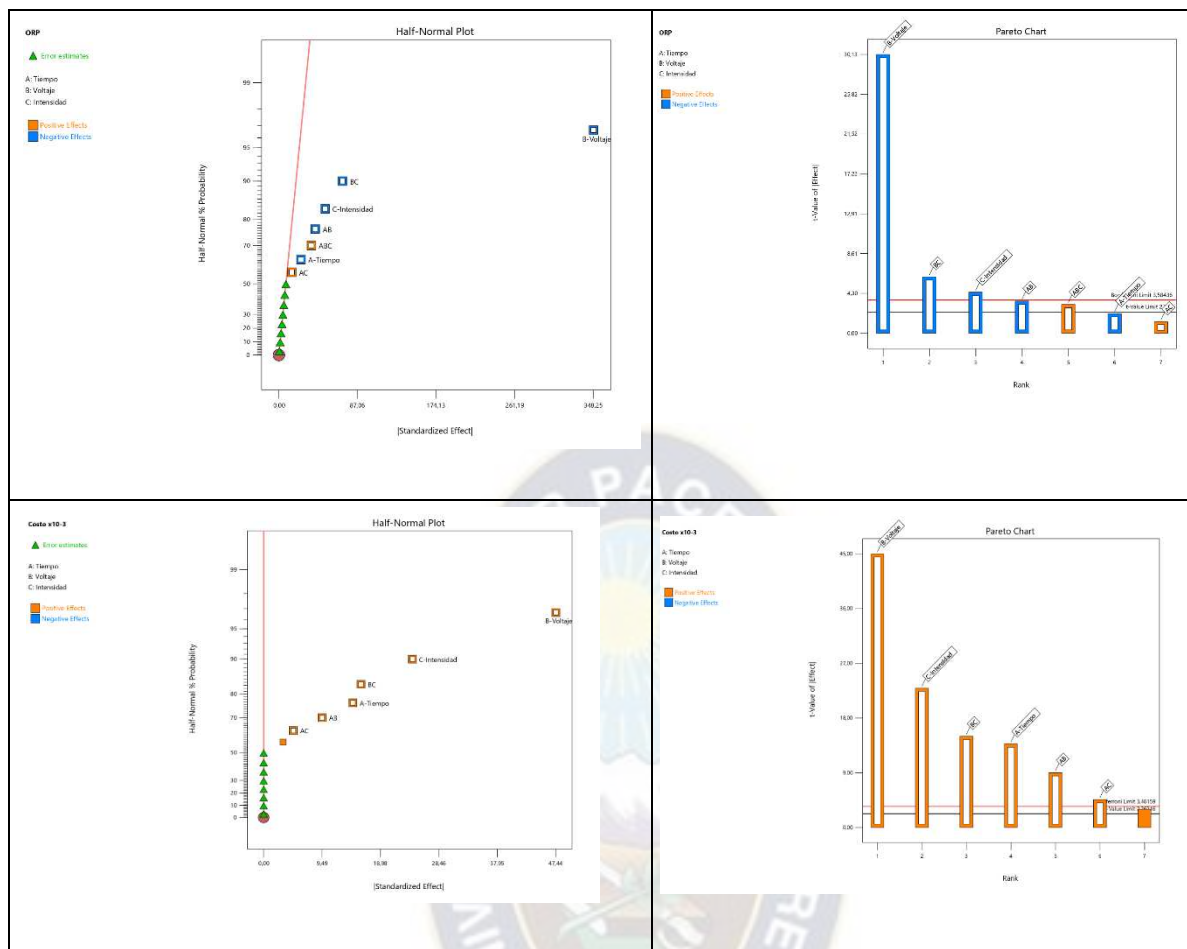


Figura 4.9 Determinación de los efectos e interacciones significativas para la construcción del modelo

Fuente: Elaboración propia en base al Programa Design Expert 12

Fuente: Elaboración propia en base al Programa Design Expert 12

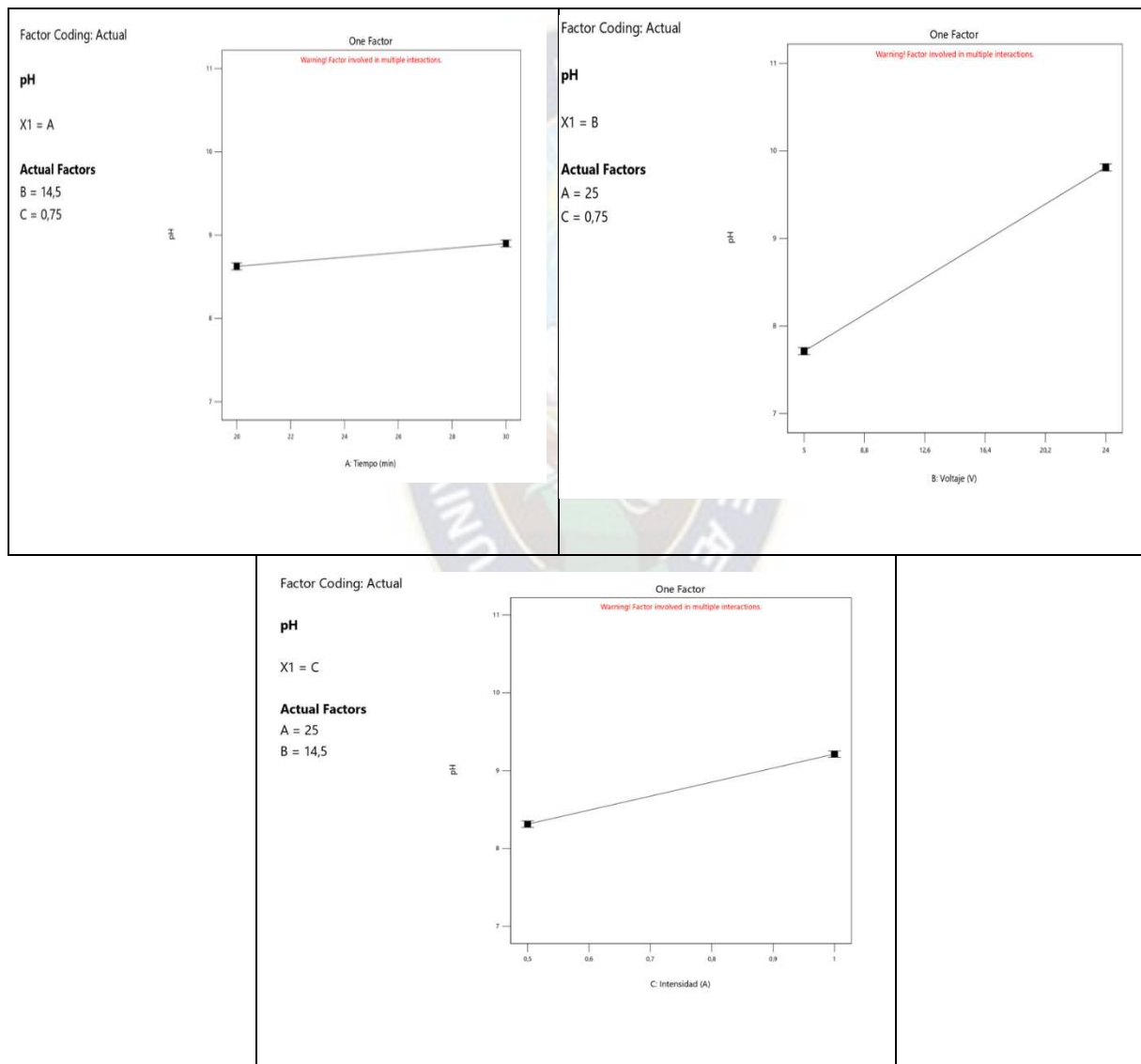
Se verifico los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia entre el orden de las pruebas, los cuales se validó y así se determinó la ecuación estadística de los efectos de las variables en la respuesta.

4.5.3 Análisis de los efectos principales y sus interacciones

De las figuras, se observó el aumento o disminución del pH, ORP, Costo, que si dependieran del efecto del tiempo manteniendo un valor de voltaje e intensidad constantes, se produjo un aumento

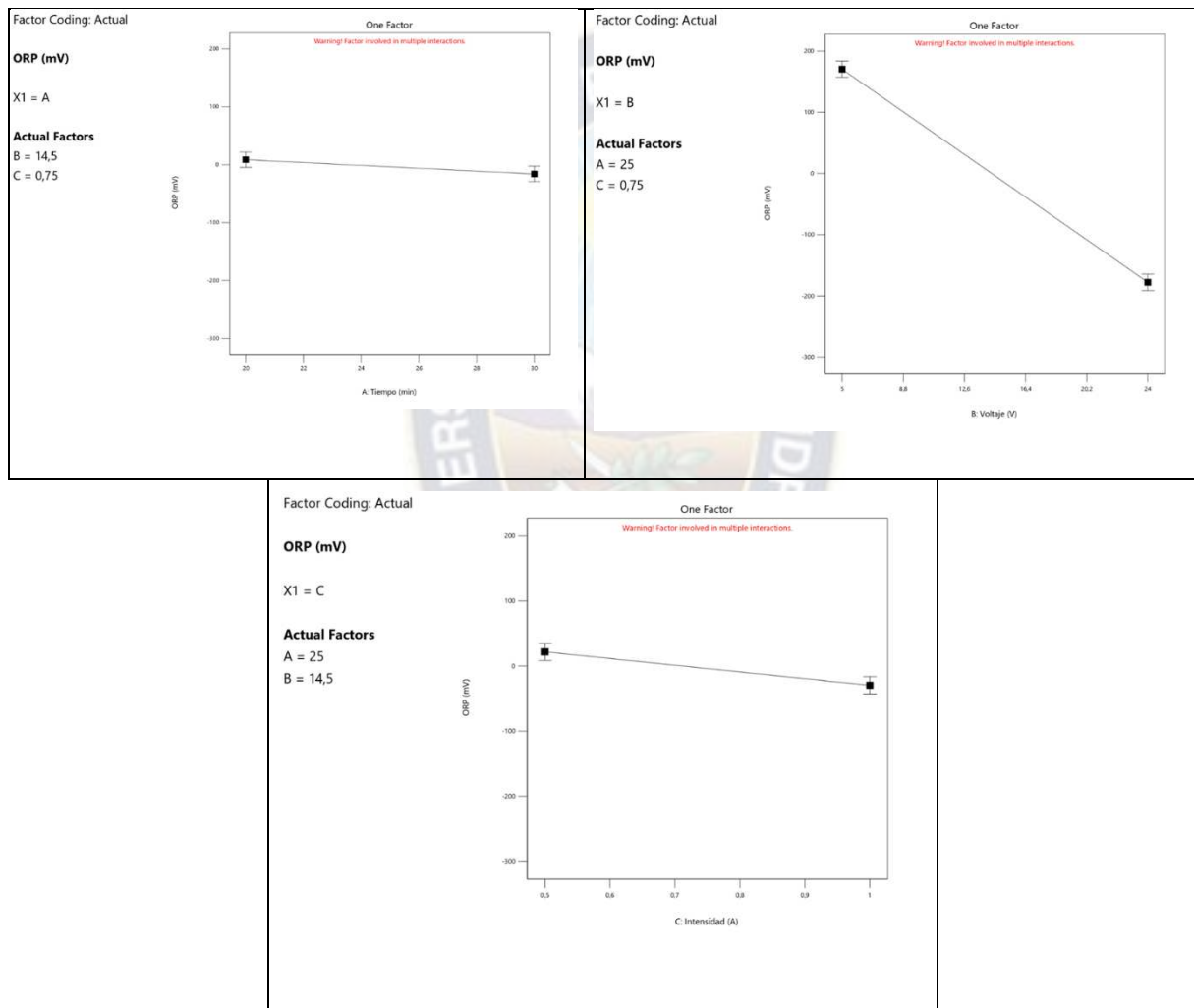
de pH muy poco significativo y por lo cual no pudo depender solo de este efecto para la realización del experimento.

Figura 4.10 Efectos en las respuestas de pH de acuerdo a los valores de los factores



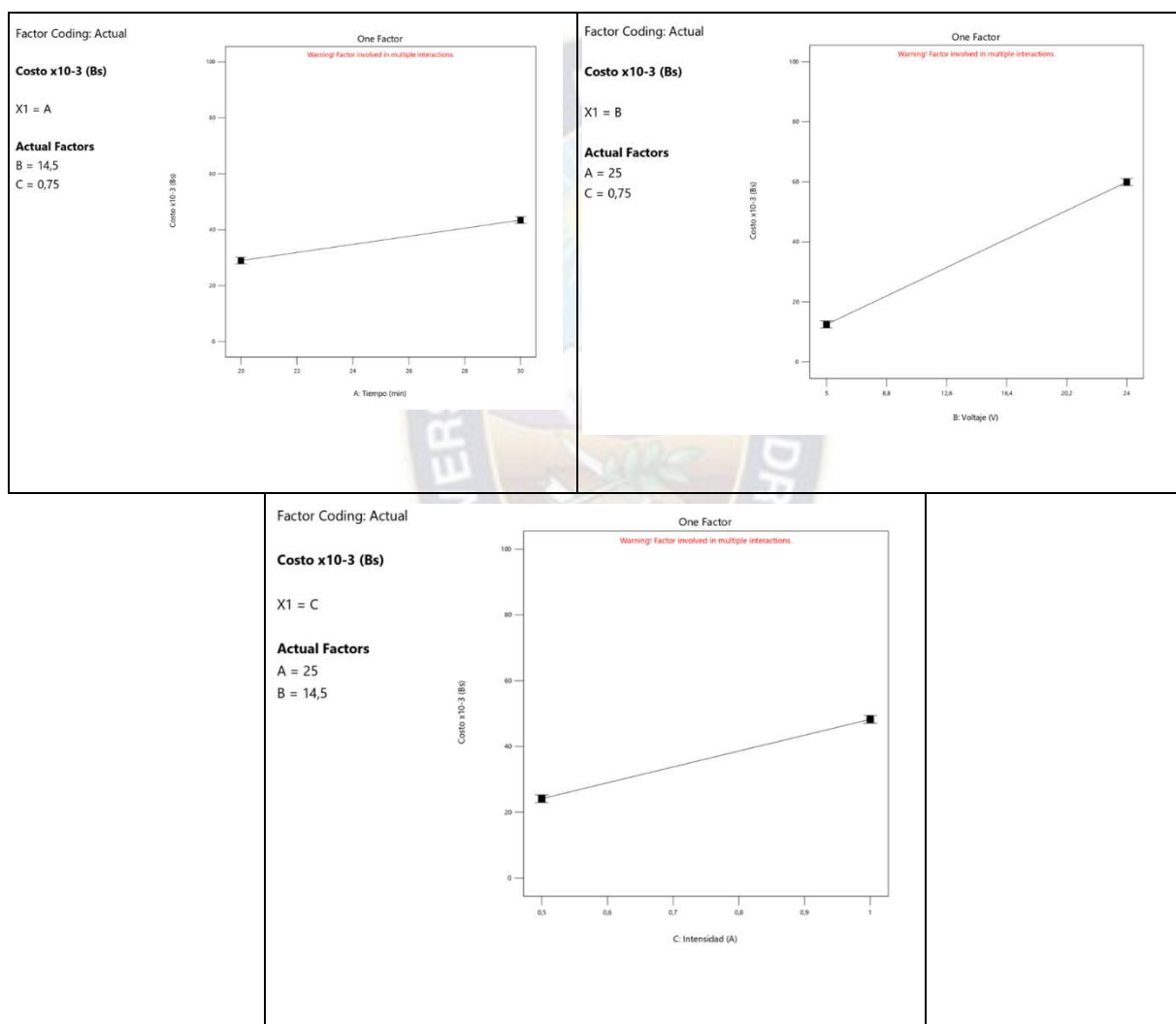
Fuente: Elaboración propia con Design Expert 12

Figura 4.11 Efectos en las respuestas de ORP de acuerdo a los valores de los factores



Fuente: Elaboración propia con Design Expert 12

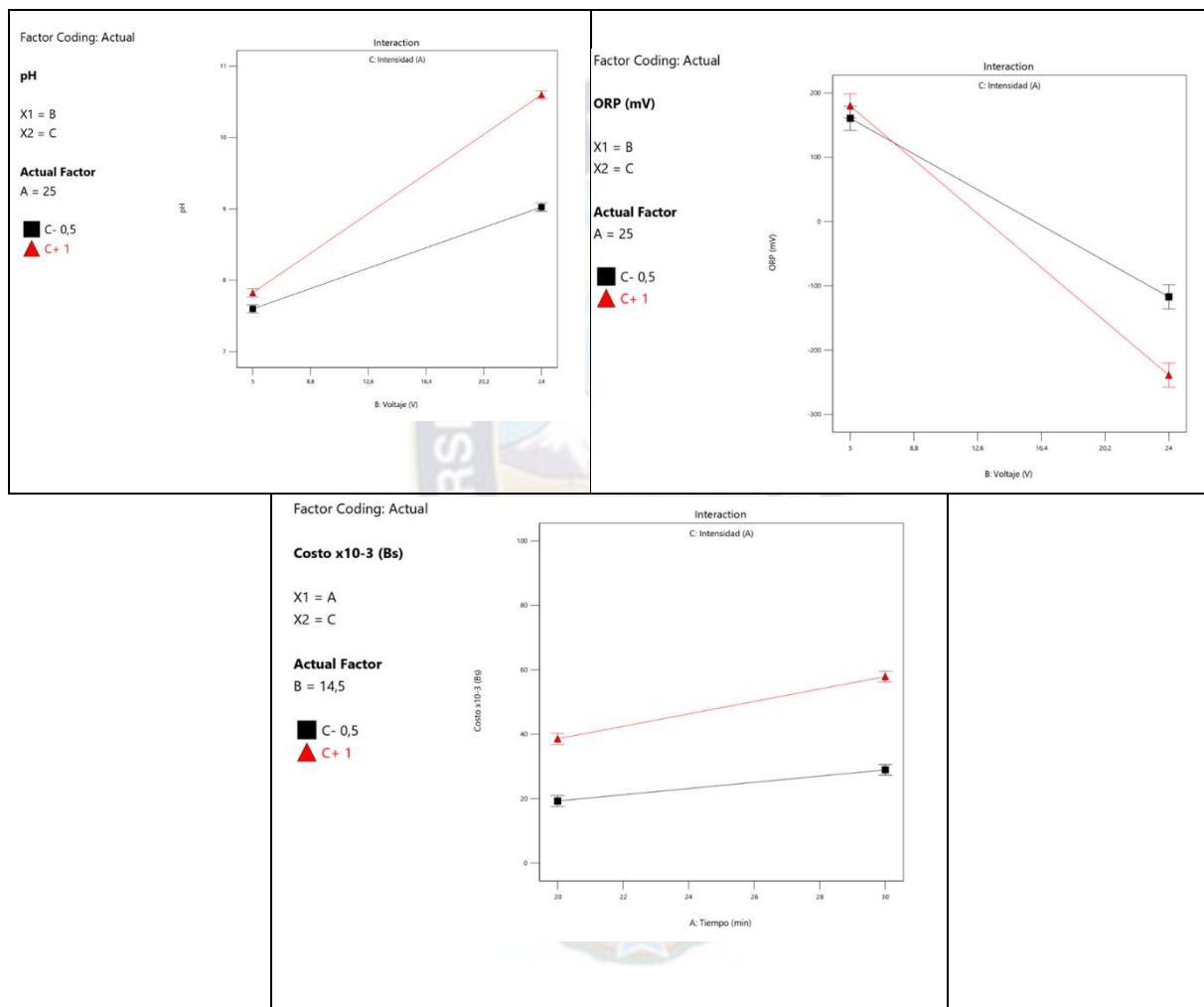
Figura 4.12 Efectos en las respuestas del Costo de acuerdo a los valores de los factores



Fuente: Elaboración propia con Design Expert 12

De la figura se interpretó que el efecto de la intensidad fue el segundo efecto más significativo para el aumento de costo del proceso. Según la figura anterior se afirma que el efecto del voltaje y de la intensidad son los efectos más importantes para el costo del proceso de obtención de agua alcalina.

Figura 4.13 Interacciones de efectos en las respuestas del pH, ORP, Costo de acuerdo a los valores de los factores



Fuente: Elaboración propia con Design Expert 12

En la figura pH vs voltaje, observo la interacción más significativa del proceso pues se observó que no solo trabajar con 1 A es muy conveniente al aumentar de 5 a 24 V a la vez que se aumentó la corriente produjo muy resultados en el aumento de pH.

La figura del ORP vs Voltaje, se observó en la interacción que trabajar con 0,5 a 1 A produce resultados muy significativos para el proceso, pues realizando una buena combinación de voltaje de 5 a 24 V se pudo reducir el valor de ORP de la forma requerida.

La figura del Costo vs Tiempo nos mostró que trabajar con una intensidad de 1 A es más costoso que trabajar con 0,5 A, especialmente en tiempos mayores a 30 min, también se observó que al trabajar con 1 A hay un aumento del costo significativamente mientras aumenta el tiempo.

4.5.4 Ecuación del modelo del diseño para el pH, ORP y Costo ajustado en función de los factores

Luego del análisis de validación del modelo y el estudio de significancia de los efectos principales y sus interacciones en el diseño experimental, Design Expert nos presentó las ecuaciones siguientes:

$$\text{pH} = 8,48684 - 0,0452632 * A - 0,147368 * B - 1,66842 * C + 0,00605263 * AB + 0,0563158 * AC + 0,273684 * BC - 0,00526316 * ABC$$

$$\text{ORP} = -220,079 + 15,9026 * A + 31,8158 * B + 519,684 * C - 1,56053 * AB - 16,2789 * AC - 52,7368 * BC + 1,51579 * ABC$$

$$\text{Costo} \times 10^{-3} = 36,2047 + -1,44819 * A + -2,49687 * B + -48,2729 * C + 0,099875 * AB + 1,93092 * AC + 3,32917 * BC$$

Donde:

A = Tiempo [minutos]

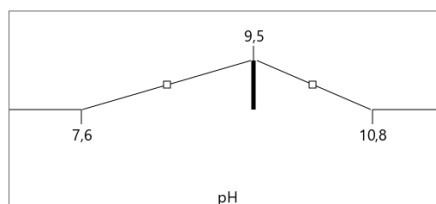
B = Voltaje [Voltios]

C = Intensidad [Amperios]

La ecuación anterior nos ayudó a predecir el valor del pH, ORP y Costo de acuerdo a los cambios que se necesitó realizar en los valores A, B, C.

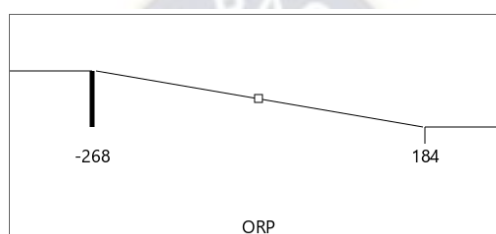
4.5.5. Optimización de los resultados

Para hallar un equilibrio óptimo entre costo, voltaje e intensidad utilizado en el proceso de obtención de agua alcalina se procedió de la siguiente forma: se trabajó con los 3 valores de respuesta (pH, ORP, Costo). Para el pH se eligió como objetivo de la optimización un valor pH=9,5

Figura 4.14 Optimización del pH

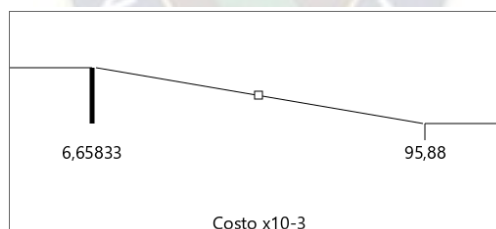
Fuente: Elaboración propia con Design Expert 12

Para el ORP se eligió como objetivo de la optimización la minimización de este factor

Figura 4.15 Optimización del ORP

Fuente: Elaboración propia con Design Expert 12

Para el costo se eligió como objetivo de la optimización la minimización de este factor

Figura 4.16 Optimización del Costo

Fuente: Elaboración propia con Design Expert 12

A continuación, se muestran las condiciones seleccionadas:

Tabla 4.6 Condiciones de optimización

Nombre	Objetivo	Límite inferior	Límite superior	Peso inferior	Peso superior	Importancia
A: Tiempo	Dentro del rango	20	30	1	1	3
B: Voltaje	Dentro del rango	5	24	1	1	3

C: Intensidad	Dentro del rango	0,5	1	1	1	3
pH	Objetivo = 9,5	7,6	10,8	1	1	4
ORP	Minimizar	-268	184	1	1	3
Costo x10-3	Minimizar	6,65833	95,88	1	1	4

Fuente: Elaboración propia con Design Expert 12

Se encontraron un total de 55 soluciones posibles

Tabla 4.7

Soluciones de la optimización

Numero	Tiempo	Voltaje	Intensidad	pH	ORP	Costo x10-3	Desirability
1	20	24	0,729	9,5	-138,127	46,435	0,736
2	20,038	24	0,728	9,5	-138,205	46,486	0,735
3	20	23,998	0,727	9,493	-137,411	46,29	0,735
4	20	23,81	0,734	9,5	-136,937	46,437	0,735
5	20	24	0,726	9,491	-137,241	46,254	0,735
6	20,157	24	0,726	9,5	-138,461	46,649	0,735
7	20	24	0,725	9,486	-136,774	46,158	0,734
8	20,327	24	0,724	9,5	-138,83	46,878	0,734
9	20	23,46	0,744	9,5	-134,703	46,44	0,733
10	20,373	23,984	0,724	9,5	-138,835	46,941	0,733
11	20	23,935	0,734	9,512	-138,901	46,676	0,732
12	20,002	24	0,718	9,462	-134,402	45,676	0,732
13	20,638	24	0,72	9,5	-139,54	47,292	0,732
14	20,155	23,201	0,749	9,5	-133,289	46,659	0,731
15	20	23,999	0,714	9,447	-132,955	45,38	0,731
16	20,193	22,58	0,768	9,5	-129,168	46,723	0,728
17	20	22,264	0,781	9,5	-126,739	46,454	0,728
18	20	22,083	0,787	9,5	-125,477	46,457	0,728
19	20	21,914	0,792	9,5	-124,298	46,459	0,727
20	20	24	0,741	9,542	-142,297	47,286	0,725
21	20	24	0,683	9,342	-122,568	43,257	0,719
22	23,411	24	0,677	9,5	-147,566	50,532	0,718
23	20	20,196	0,857	9,5	-111,466	46,491	0,718
24	30	24	0,5	9,35	-174,5	49,521	0,718
25	30	24	0,509	9,376	-175,823	50,35	0,718
26	20	20,135	0,859	9,5	-110,982	46,493	0,718
27	29,949	24	0,5	9,347	-173,915	49,424	0,718

28	30	24	0,522	9,412	-177,654	51,498	0,717
29	30	23,898	0,508	9,362	-173,706	49,998	0,717
30	29,762	24	0,524	9,401	-175,266	51,18	0,717
31	24,264	24	0,663	9,5	-150,715	51,357	0,716
32	29,991	24	0,554	9,5	-182,095	54,318	0,715
33	29,307	24	0,529	9,387	-171,064	50,742	0,715
34	24,646	24	0,657	9,5	-152,241	51,699	0,714
35	29,661	24	0,561	9,5	-179,729	54,288	0,714
36	24,367	24	0,65	9,463	-148,169	50,545	0,714
37	29,999	23,864	0,558	9,498	-180,148	54,367	0,714
38	29,176	24	0,501	9,299	-165,147	48,012	0,713
39	28,97	24	0,55	9,425	-170,774	51,893	0,713
40	20	19,227	0,899	9,5	-103,494	46,517	0,713
41	25,451	24	0,643	9,5	-155,689	52,356	0,713
42	28,631	24	0,572	9,469	-170,978	53,13	0,712
43	28,538	24	0,566	9,445	-168,992	52,411	0,712
44	25,667	24	0,637	9,494	-156,196	52,351	0,712
45	25,801	24	0,637	9,5	-157,294	52,616	0,712
46	28,409	24	0,575	9,466	-169,405	53,001	0,712
47	26,117	24	0,631	9,5	-158,8	52,837	0,711
48	26,342	24	0,627	9,5	-159,899	52,983	0,711
49	27,952	24	0,581	9,456	-165,926	52,563	0,711
50	26,71	24	0,62	9,5	-161,773	53,213	0,711
51	27,603	24	0,594	9,473	-164,864	52,898	0,711
52	27,012	24	0,613	9,496	-163,074	53,266	0,711
53	20	17,463	0,991	9,5	-87,16	46,578	0,701
54	20	17,404	0,995	9,5	-86,568	46,58	0,701
55	20	17,186	1	9,482	-82,837	46,218	0,697

Fuente: Elaboración propia con Design Expert 12

De las cuales se eligieron 6 que llegan a cumplir con un valor de pH cercano al requerido además de un costo bajo:

Tabla 4.8

Soluciones óptimas para la obtención del agua alcalina ionizada

Solución	Tiempo, min	Voltaje, V	Intensidad, A	pH	ORP, mV	Costo x10 ⁻³ , Bs
19	20	21,91	0,7924	9,499	-124,298	46,4588
21	20	24	0,6833	9,342	-122,568	43,2573

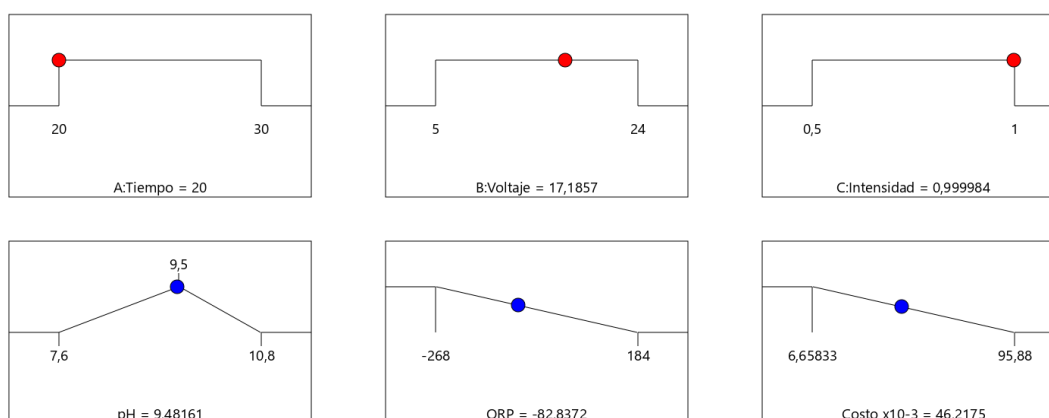
23	20	20,19	0,857	9,499	-111,466	46,4914
40	20	19,23	0,899	9,5	-103,494	46,5171
53	20	17,46	0,991	9,5	-87,16	46,5776
55	20	17,18	0,999	9,48	-82,83	46,2175

Fuente: Elaboración propia con Design Expert 12

De las 6 soluciones se seleccionó la 55, debido a que cumple de buena manera el requisito de pH elegido y de costo reducido, además que para ello utilizo un valor bajo de voltaje que es el efecto que más influye en el costo del proceso.

Esto se puede visualizar en las siguientes figuras:

Figura 4.17 Condiciones óptimas de la obtención del agua alcalina para el proyecto



Fuente: Elaboración propia con Design Expert 12

Por lo tanto, para obtener un agua de pH = 9,48, se tuvieron los siguientes factores o condiciones de operación para la obtención del agua alcalina ionizada:

Tabla 4.9

Valores de las condiciones óptimas a aplicar en el proyecto para la obtención del agua alcalina ionizada

FACTORES	VALOR	RESPUESTAS	VALOR
Tiempo (min)	20	pH	9,48
Voltaje (V)	17,18	ORP (mV)	-82,84
Intensidad (A)	1	Costo x10-3, (Bs)	46,22

Fuente: Elaboración propia

4.6. RESULTADO DE LOS ANÁLISIS DEL AGUA ALCALINA IONIZADA PRODUCIDA EN EL LABORATORIO

Luego de que se realizó el tratamiento estadístico del diseño experimental, con los valores óptimos de operación encontrados y presentados en la tabla 4.9 se hizo la respectiva experimentación, en la celda electrolítica, en el cual se aplicó el potencial de voltaje de 17,2 V, una corriente de 1 A durante el tiempo de 20 min, realizando el proceso de producción en la celda electrolítica se obtuvo el producto con los parámetros característicos del agua alcalina ionizada, los resultados de los análisis se lo hizo en el Instituto de Ecología – Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA), esto con el objetivo de dar veracidad a los resultados, porque que el LCA cuenta con certificación para la confianza de los análisis. (Ver más en ANEXOS H)

Tabla 4.10

Resultados de los análisis del laboratorio de Calidad Ambiental LCA para el agua alcalina ionizada

Parámetro	Unidad	Agua de alcalina ionizada
pH		9,35
Calcio	mg/l	2,1
Potasio	mg/l	1,2
Sodio	mg/l	19
Magnesio	mg/l	0,94
Conductividad eléctrica	μS/cm	132
Sólidos totales disueltos	mg/l	68
Cloruros	mg Cl/l	7,0
Dureza total	mg CaCO ₃ /l	9,0
Turbidez	UTN	0,16
ORP	mV	-95,8

Fuente: Elaboración propia en base a resultados del LCA

Según la norma boliviana NB 512: 2016 de Requisitos para el Agua Potable mencionada anteriormente en la sección 4.1, en el cual se presentan los valores establecidos para los diferentes parámetros, el cual no debe ser excedido para no incidir en la salud humana.

Comparando los resultados de los análisis del agua alcalina ionizada producida para consumo humano con los requisitos de la norma NB 512: 2016 de agua potable, se verificó que es apta para consumo humano y que cumple con lo establecido en la presente norma. Por lo tanto, se da por aceptado el consumo del agua alcalina ionizada producida mediante el proceso de la electrolisis.

El análisis del ORP se realizó en el laboratorio del IIDEPROQ, con el tester medidor de calidad del agua, dando la lectura de un ORP negativo comprobando así que se obtuvo un agua antioxidante.

4.7. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DEL AGUA ALCALINA IONIZADA “XYZ” PRODUCIDA POR UNA EMPRESA EN BOLIVIA

En el departamento de La Paz la empresa productora de agua alcalina ionizada presenta su producto con el nombre comercial de “XYZ”, este producto se utilizó como referencia sus parámetros de calidad para compararlos con los del agua producida en el presente proyecto, por lo tanto, se realizó los siguientes análisis. (Ver más en ANEXO I)

Tabla 4.11

Resultados de los análisis del laboratorio de Calidad Ambiental LCA para el agua alcalina ionizada “XYZ”

Parámetro	Unidad	Agua alcalina comercial
pH		9,2
Calcio	mg/l	0,39
Potasio	mg/l	0,37
Sodio	mg/l	1,1
Magnesio	mg/l	0,73
Conductividad eléctrica	$\mu\text{S/cm}$	14
Sólidos totales disueltos	mg/l	<10
Cloruros	mg Cl/l	1,0
Dureza total	mg CaCO_3 /l	4,0
Turbidez	UTN	0,16
Coliformes totales	NMP/100ml	<2,0
ORP	mV	86

Fuente: Elaboración propia en base a resultados del LCA

Comparando los resultados de la tabla 4.10 del agua alcalina producida y los de la tabla 4.11 del agua alcalina comercial, se verificó que el agua producida en el laboratorio cuenta con mejores parámetros de calidad característicos del agua alcalina ionizada, con más beneficios a la salud de los consumidores.

4.8. RESULTADO DE LOS ANÁLISIS DEL AGUA ACIDA PRODUCIDA EN EL LABORATORIO

El subproducto que se obtuvo durante la producción es el agua acida, esta puede ser aprovechada para uso externo, ya que, sirve como desinfectante, mata bacterias al poner en contacto, sería un reemplazo a las soluciones cloradas que se utilizan comúnmente en la desinfección de canales de tuberías y materiales que se puedan utilizar.

Los resultados de los análisis se realizaron en el Instituto de Ecología – Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA), esto con el objetivo de dar veracidad a los resultados. (Ver más en ANEXOS J)

Tabla 4.12

Resultados de los análisis del laboratorio de Calidad Ambiental LCA para el agua acida

Parámetro	Unidad	Agua acida
pH		5,8
Calcio	mg/l	1,7
Potasio	mg/l	1,0
Sodio	mg/l	4,8
Magnesio	mg/l	0,81
Conductividad eléctrica	$\mu\text{S/cm}$	52
Sólidos totales disueltos	mg/l	34
Cloruros	mg Cl/l	7,5
Dureza total	mg CaCO_3/l	7,5
Turbidez	UTN	<10
ORP	mV	258

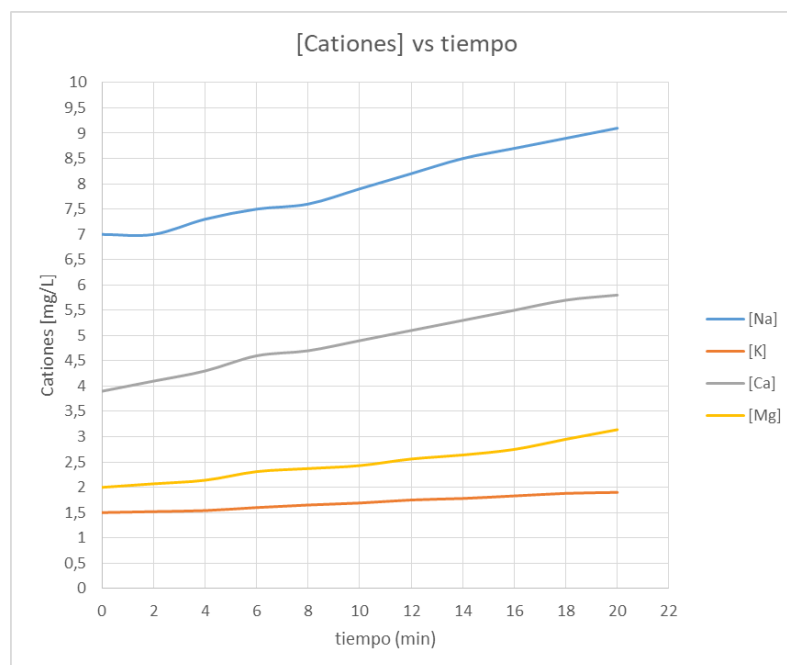
Fuente: Elaboración propia en base a resultados del LCA

4.9. CURVAS EXPERIMENTALES DE CONCENTRACION DE CATIONES VS TIEMPO DURANTE LA PRODUCCIÓN DEL AGUA ALCALINA IONIZADA

En la producción del agua alcalina se consideró los parámetros óptimos de operación hallados en el diseño experimental, se procedió a tomar muestras cada cierto tiempo y analizarlos, para

determinar cómo varía las concentraciones de los cationes en función del tiempo, hasta llegar a obtener el producto. (Ver más en ANEXO M)

Figura 4.18 Curvas de concentración de cationes Vs tiempo



Fuente: Elaboración propia

Para la representación de los datos experimentales para los todos los cationes, se evidencio que se tuvo un comportamiento lineal de la concentración en función del tiempo, realizando regresiones lineales a cada caso, se obtuvo ecuaciones experimentales del enriquecimiento de cationes que hubieron en la parte cátodo, durante el tiempo que ocurrió en el proceso de la electrolisis.

Las ecuaciones experimentales de la concentración de cationes en función del tiempo son:

$$[Na^+] = 6,8409 + 0,1132 * t \quad (mg/l)$$

$$[Ca^{2+}] = 3,9318 + 0,0968 * t \quad (mg/l)$$

$$[Mg^{+2}] = 1,9464 + 0,0541 * t \quad (mg/l)$$

$$[K^+] = 1,4777 + 0,0217 * t \quad (mg/l)$$

Estas ecuaciones fueron utilizadas para llegar a cierta concentración de cationes en el agua alcalina ionizada, producida durante la electrolisis.

4.10. DETERMINACION DE LA MASA PRODUCIDA DE H₂ Y O₂

Durante el proceso de producción del agua alcalina ionizada se recolecto los gases de H₂ y O₂ producto de la electrolisis, se hizo la cuantificación de la masa de los gases y el volumen de agua que se convierte en gas.

Tabla 4.13 Datos del proceso de producción del agua alcalina ionizada

V (V)	T (°C)	t (min)	I (A)	V _{H2} (mL)	V _{O2} (mL)	h _{H2} (cm)	h _{O2} (cm)
17,2	15	0	1,0	0	0	0	0
		5		1,0	0,5	1,4	0,7
		10		2,1	1,2	2,5	1,4
		14		4,1	2,0	3,8	1,9
		16		6,8	3,4	6,6	3,3
		18		7,5	3,7	7,1	4,7
		20		8,3	4,1	9,4	5,6
		t _{total} =20		I=1,0	V _{total} =8,3	V _{total} =4,1	h _{total} =9,4

Fuente: Elaboración propia

Realizo los siguientes cálculos:

a) Para el cátodo con la ecuación 2.47 se tuvo:

$$P_{atm} + h_{Hg} = P_{H_2} + P_{v_{H_2O}} \dots (*)$$

Se tomo en cuenta los siguientes datos para reemplazar en la ecuación (*) y así determinar el valor de P_{H₂}:

$$P_{atm} = 495 \text{ mmHg} \cdot 101325 \text{ Pa} / 760 \text{ mmHg} = 65994,570 \text{ Pa}$$

Se convirtió la altura medido en altura de Hg: $\rho_1 \cdot h_1 = \rho_2 \cdot h_2 \dots (**)$

$$h_{Hg} = (1 \cdot 9,4 / 13,6) [\text{cmHg}] = (0,691 \text{ cmHg} * 101325 \text{ Pa}) / 76 \text{ cmHg} = 2254,481 \text{ Pa}$$

Para la presión de vapor se determinó de tablas a 15 °C y 0,65 atm:

$$P_{V_{H_2O}} = (0.029858 \text{ Bar} * 105 \text{ Pa}) / 1 \text{ Bar} = 2985,8 \text{ Pa}$$

De la ecuación (*) se obtiene: $P_{H_2} = 65263,251 \text{ Pa}$

De la ecuación de estado 2.48 para gases ideales, reemplazando se tuvo:

$$m_{H_2} = \frac{P_{H_2} * V_{H_2} * M_{H_2}}{R * T}$$

$$m_{H_2} = 1,057 * 10^{-1} \text{ g}$$

b) Para el ánodo de igual manera realizando los mismos cálculos para el O_2 , se tuvo:

$$m_{O_2} = \frac{P_{O_2} * V_{O_2} * M_{O_2}}{R * T}$$

$$m_{O_2} = 8,34 * 10^{-1} \text{ g}$$

c) Calculando la masa de agua que se convirtió en gas

$$1,057 * 10^{-1} \text{ g } H_2 * \frac{2 \text{ mol } H_2O}{2 \text{ mol } H_2} * \frac{1 \text{ mol } H_2}{2 \text{ g } H_2} * \frac{18 \text{ g } H_2O}{1 \text{ mol } H_2O} * \frac{1 \text{ mL } H_2O}{1 \text{ g } H_2O} = 0,95 \text{ mL}$$

$$8,34 * 10^{-1} \text{ g } O_2 * \frac{2 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } O_2} * \frac{1 \text{ mol } O_2}{32 \text{ g } O_2} * \frac{18 \text{ g } H_2O}{1 \text{ mol } H_2O} * \frac{1 \text{ mL } H_2O}{1 \text{ g } H_2O} = 0,93 \text{ mL}$$

Por lo tanto, el volumen de agua que se perdió en el proceso de la electrolisis fue:

$$V_{H_2O} (\text{perdido}) = 1,88 \text{ mL}$$

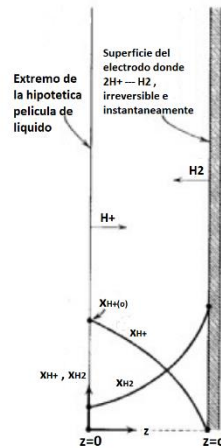
Frente al volumen total de 1000 mL que contiene de agua la celda, este volumen se consideró despreciable.

4.11. BALANCE DE MATERIA HACIA EL ELECTRODO

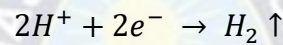
Según el punto 2.9 se dio el enfoque a la difusión con reacción química heterogénea, debido a las reacciones del H_2 y O_2 en la superficie del electrodo.

- Balance de materia en la zona del cátodo:

Figura 4.19 Modelo del problema de difusión cerca de la superficie del cátodo



La reacción en el cátodo fue:



Realizando el balance de materia: $[E] - [S] + [P] - [C] = [A]$

Como la reacción química es heterogénea y no así homogénea, $[P]$ y $[C]$ son cero, y la $[A]$ es cero porque es un estado estacionario, entonces:

$$[E] - [S] = 0$$

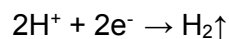
$$AN_{H^+(z)}|_z - AN_{H^+(z)}|_{z+\Delta z} = 0$$

Tomando en cuenta la ecuación 2.46 de la ley de Fick:

$$N_A = x_A(N_A + N_B) - D_A C \frac{dx_A}{dx} \quad \text{Ecuacion 2.46}$$

Dónde: $A = H^+$, $B = H_2$, $x = z$

Reacción de reducción del ion H^+ en el cátodo:



Para el N_{H_2} se obtuvo por estequiometría

$$N_{H_2(z)} = -\frac{1}{2}N_{H^+(z)}$$

Reemplazando lo anterior se tuvo en la ecuación de Fick:

$$N_{H^+(z)} = -\frac{CD_{H^+}}{1 - \frac{x_{H^+}}{2}} \frac{dx_{H^+}}{dz}$$

La ecuación de balance de materia resulto:

$$\frac{dN_{H^+(z)}}{dz} = 0$$

Reemplazando la expresión $N_{H^+(z)}$ en la ecuación (), para D_{H^+} constante

$$\frac{d}{dz} \left(-\frac{1}{1 - \frac{x_{H^+}}{2}} \frac{dx_{H^+}}{dz} \right) = 0$$

Integrando dos veces con respecto a z:

$$-2 \ln \left(1 - \frac{x_{H^+}}{2} \right) = C_1 z + C_2$$

C_1 y C_2 son las constantes de integración, que se calcularan utilizando las condiciones limite:

$$\text{C.L. 1: } z = 0, \quad x_{H^+} = x_{H^+(0)}$$

$$\text{C.L. 2: } z = d, \quad x_{H^+} = 0$$

El resultado final para el perfil de concentración en la interface de la película, es:

$$\left(1 - \frac{x_{H^+}}{2} \right) = \left(1 - \frac{x_{H^+}}{2} \right)^{1 - \left(\frac{z}{d} \right)}$$

La ecuación puede utilizarse ahora para obtener la densidad de flujo molar a través de la película:

$$N_{H^+(z)} = \frac{2CD_{H^+}}{d} \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{x_{H^+(0)}}{2}} \right)$$

Si $C_{H^+(0)} = x_{H^+(0)} * c$, c es la concentración de H^+ en el seno del electrolito la ecuación resultará:

$$N_{H^+(z)} = \frac{2CD_{H^+}}{d} \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{2} * \frac{C_{H^+(0)}}{c}} \right)$$

En la sección 4.4.1 se calculó el valor del coeficiente de difusión para la zona catódica, donde la sustancia que se reduce será el ion H^+

$$D = D_{H^+} = 3,48 \cdot 10^{-5} \text{ [cm}^2/\text{s]}$$

$$\text{Dónde: } C = 10^{-7,6} \text{ mg/l} = 10^{-10,6} \text{ mg/cm}^3,$$

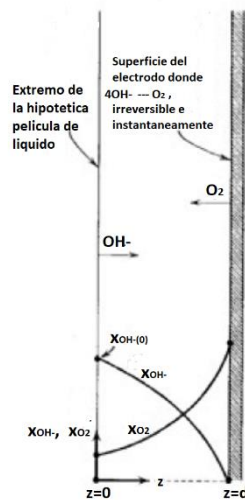
$$d = 2,0 \text{ cm}$$

$$N_{H^+(z)} = 8,74 \cdot 10^{-16} \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{C_{H^+(0)}}{5,02 \cdot 10^{-11}}} \right) \left[\frac{\text{mg}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2} \right]$$

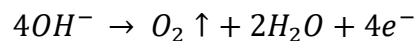
La magnitud de N_{H^+} represento la distribución de concentración, la conversión de H^+ a H_2 controlado por la difusión, por unidad de área de superficie del electrodo

- Balance de materia en la zona del ánodo:

Figura 4.20 Modelo del problema de difusión cerca de la superficie del ánodo



La reacción en el ánodo es:



Realizan el balance de materia: $[E] - [S] + [P] - [C] = [A]$

Como la reacción química es heterogénea y no así homogénea, [P] y [C] son cero, y la [A] es cero porque es un estado estacionario, entonces:

$$[E] - [S] = 0$$

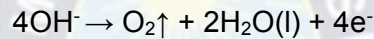
$$AN_{OH^-(z)}|_z - AN_{OH^-(z)}|_{z+\Delta z} = 0$$

Tomando en cuenta la ecuación 2.46 de la ley de Fick:

$$N_A = x_A(N_A + N_B) - D_A C \frac{dx_A}{dx}$$

Dónde: A = OH⁻, B = O₂, x = z

Reacción de reducción del ion H⁺ en el cátodo:



De la ecuación de reacción para el N_{H₂} se obtiene por estequiometria:

$$N_{O_2(z)} = -\frac{1}{4}N_{OH^-(z)}$$

Reemplazando lo anterior se tuvo en la ecuación de Fick:

$$N_{H^+(z)} = -\frac{CD_{H^+}}{1 - \frac{x_{H^+}}{4}} \frac{dx_{H^+}}{dz}$$

La ecuación de balance de materia resulto:

$$\frac{dN_{OH^-(z)}}{dz} = 0$$

Realizando el mismo tratamiento de cálculo que en la zona catódica, se tuvo:

La densidad de flujo molar a través de la película:

$$N_{OH^-(z)} = \frac{4CD_{OH^-}}{d} \ln\left(\frac{1}{1 - \frac{x_{OH^-(0)}}{4}}\right)$$

Si $C_{OH^-(0)} = x_{OH^-(0)} * c$, c es la concentración de OH⁻ en el seno del electrolito la ecuación resulto:

$$N_{OH^-(z)} = \frac{4CD_{OH^-}}{d} \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{4} * \frac{C_{OH^-(0)}}{c}} \right)$$

De la sección 4.4.1 se calculó el valor del coeficiente de difusión para la zona anódica, donde la sustancia que se reduce será el ion OH⁻

$$D = D_{OH^-} = 3,69 * 10^{(-6)} \text{ cm}^2/\text{s}$$

Dónde: C = 10^(-6,4) mg/l = 10^(-9,4) mg/cm³ ; d = 2,0 cm

$$N_{OH^-(z)} = 2,94 * 10^{-15} \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{C_{OH^-(0)}}{1,59 * 10^{-9}}} \right) \left[\frac{\text{mg}}{\text{s} * \text{cm}^2} \right]$$

La magnitud de N_{OH⁻} representa la distribución de concentración, la conversión de OH⁻ a O₂ controlada por la difusión, por unidad de área de superficie del electrodo.

4.12. ANALISIS DEL COSTO DE PRODUCCIÓN

La estimación del costo de producción del agua alcalina ionizada, se calculó a nivel laboratorio con un volumen de producción de 500 mL.

Tabla 4.14

Variables y resultados de la producción final del agua alcalina

Variables	Valor	Resultados	Valor
Tiempo (min)	20	pH	9,35
Voltaje (V)	17,18	ORP (mV)	-82,84
Intensidad (A)	1	Costo x10-3, (Bs)	46,22

Fuente: Elaboración propia

Con la ecuación 2.12 de consumo eléctrico se calculó el costo de energía de la producción:

$$P_{Real} = I^2 * R_{celda} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Siendo R_{celda} = 407,2 ohm y I = 1 A, la P_{Real} fue: P_{Real} = 311,1 W

$$\text{consumo de electrico} = 407,2 \text{ W} \times \frac{1\text{kW}}{1000\text{W}} \times 20\text{min} \times \frac{1\text{h}}{60\text{min}}$$

Consumo de eléctrico = 0,136 kW-h

Como información se tiene que la tasa de costo de energía por DELAPAZ de 0,85 Bs/kW-h

- Costo de los materiales y equipos

Tabla 4.15 Costos de materiales y equipos

Material y/o equipo	Cantidad	Costo (Bs)
Fuente de poder CC de 30 V Y 5 A	1	450
Electrodo de placa de Titanio revestido con platino	2	1233,8
Membrana de intercambio catiónico CMI-7000	1	183,2
Medidor probador de calidad del agua IP67-Yieryi	1	285,2
Celda electrolítica	1	385

Fuente: Elaboración propia

- Costo de producción

Se tomó en cuenta una depreciación del uso de los materiales y equipos del 0,1%

Tabla 4.16

Costos para la producción de 500 mL de agua alcalina ionizada

Insumos, materiales, equipos	Costo (Bs)
500 ml de agua de mesa	0,30
Costo eléctrico o energía	0,11
Fuente de poder de CC	0,45
Electrodo de placa de Titanio	1,23
Membrana CMI-7000	0,18
Medidor de Calidad Yieryi	0,28
Celda electrolítica	0,38
Costo total	2,93

Fuente: Elaboración propia

Se tomó como referencia el agua alcalina ionizada “XYZ” disponible en el mercado boliviano, por ejemplo, el costo de una botella de 2 L es de 15 Bs, entonces considerando el costo total para 500 mL del agua producida, se tiene el costo para 2 L de 11,72 Bs. Por lo tanto, con este análisis se puede notar que hay una diferencia aproximadamente de 20% en el costo, con un estudio de pre factibilidad técnico - económico se podrá identificar si el producto es competente o no en el mercado.



CAPITULO V
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Con los parámetros electroquímicos óptimos para la producción, se obtuvo los siguientes parámetros de calidad en el agua alcalina ionizada, y también se presentan los resultados de los análisis de parámetros de calidad de las diferentes muestras.

Parámetro	Unidad	Agua de Osmosis I	Agua alcalina ionizada	Agua alcalina comercial	Agua acida
pH		7,6	9,35	9,2	5,8
Calcio	mg/L	3,9	5,8	0,39	1,7
Potasio	mg/L	1,5	1,9	0,37	0,5
Sodio	mg/L	7,0	9,1	1,1	1,9
Magnesio	mg/L	2,0	2,9	0,73	0,86
Conductividad eléctrica	μS/cm	79	132	14	52
Sólidos totales disueltos	mg/L	42	68	<10	34
Cloruros	mg Cl/L	3,1	3,3	1,0	7,5
Dureza total	mg CaCO ₃ /L	18	9,0	4,0	7,5
Turbidez	UTN	0,59	0,16	0,16	<0,10
ORP	mV	184	-95,8	86	258

Los parámetros de calidad del agua alcalina ionizada obtenida, los valores cumplen con los de la Norma Boliviana NB 512:2016, siendo así un alimento inocuo para el consumo humano.

Se realizó el diseño y construcción de la celda electrolítica con una capacidad de producción de agua alcalina ionizada de 500 mL, celda tipo Alcalina de forma cubica, dos electrodos de placa de titanio con recubrimiento de platino de 1 mm cada electrodo de medidas 10*1*0,3 cm, la membrana CMI – 7000 de medidas 10*10 cm, una separación de electrodo – membrana de 1 cm, la celda en material acrílico de 5 mm de espesor.

De los análisis del diseño experimental, se obtuvieron los parámetros electroquímicos para la condición óptima de producción del agua alcalina ionizada.

FACTORES	VALOR
Tiempo (min)	20
Voltaje (V)	17,18
Intensidad (A)	1

Para el estudio de cinética de la electrolisis se determinó con el modelo cinético de Butler – Volmer, donde el modelo describió como la corriente eléctrica a través del electrodo depende de la diferencia de potencial entre el electrodo de titanio y el electrolito (agua).

$$i = 36,803 * e^{-\frac{8819,89}{T}(E+2,7)} * \left[C_{O(0,t)} - C_{R(0,t)} * e^{\frac{46420,49}{T}(E+2,7)} \right] \quad [A]$$

El costo de producción para el agua alcalina ionizada resulto de 11,62 Bs un volumen de 2 L, para dar viabilidad al producto se tendrá que realizar un estudio de factibilidad técnico-económico para competir en el mercado.

5.2. RECOMENDACIONES

- ❖ Se recomienda que el agua de osmosis inversa utilizada como alimentación, contenga concentraciones mayores en cationes, pero dentro del límite permitido en la norma NB 512:2016, estos elevan los hidroxilos en la estructura química del agua haciéndola más rica en oxígeno, convirtiéndola en agua alcalina ionizada.
- ❖ Se recomienda utilizar un agitador magnético para evitar la formación de burbujas de gas en la superficie de contacto del electrodo, para disminuir la resistencia.
- ❖ Para el pre acondicionamiento de la membrana CMI – 7000, se recomienda lavar la membrana con agua destilada luego del remojo en NaCl, esto para evitar cierta alteración en la concentración de Na⁺ en el agua alcalina obtenida.
- ❖ Se recomienda realizar un estudio de factibilidad técnico-económico al costo del agua alcalina, esto con el fin de conocer la competencia que pueda tener en el mercado.
- ❖ Se recomienda no desechar el agua acida producida en la electrolisis, sino, dar un aprovechamiento a sus propiedades antisépticas, desinfectantes, ya que posee alto poder oxidante y acidez.

BIBLIOGRAFIA

/1/ Khushboo, P., Lipsa, S., Priti, Y., Divya, P., Kaenat, S., Shivani, P. y Hitesh, J. (2014). Alkaline water: the disease fighting water. *World Journal of pharmaceutical research*, 3 (3), 3845-3853.

https://wjpr.s3.ap-south-1.amazonaws.com/article_issue/1398836418.pdf

/2/ Marc, H., Jacques, C. (2013). Physico-Chemical, Biological and Therapeutic Characteristics of Electrolyzed Reduced Alkaline Water (ERAW). *Journal water*, 5, 2095-2111.

<https://doi.org/10.3390/w5042094>

/3/ AEMP (2019, agosto) Estudio de mercado de agua embotellada en Bolivia. *Instituto técnico superior INCOS*. Consultado el 10 de enero de 2023.

<https://www.studocu.com/bo/document/instituto-tecnico-superior-incos-tarija/contabilidad-i/estudio-mdo-agua-embotellada-vf-ago2019/29751444>

/4/ Correo del Sur (2017, 11 de junio) Ion Life: “El agua de la eterna juventud”. Consultado el 15 de enero de 2023.

https://correodelsur.com/ecos/20170611_ion-life-el-agua-de-la-eterna-juventud.html

/5/ Carbotecnia (2022, 26 de julio) Osmosis inversa. Consultado el 16 de enero de 2023.

<https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/osmosis-inversa/que-es-la-osmosis-inversa-purificador/>

/6/ Biocidas y químicos S.A.S (1999) Membranas de Osmosis Inversa. Consultado el 16 de enero de 2023.

<https://www.biocidasyquimicos.com/membranas-de-osmosis-inversa/>

/7/ Vadthya, P., Nagamani, T., Sridhar, S. (2019). Ultrafiltration membrane assisted cost effective ionizer for production of therapeutic alkaline ionized water. *Journal of Water Process Engineering*, 32, 2-12.

<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100951>

/8/ Romero, J., (2018). Producción de hidrógeno vía electrolítica para su uso en automoción. *Universidad de Valladolid*, 13-50.

/9/ Kelly, N. A. (2014) 'Hydrogen production by water electrolysis', *Advances in Hydrogen Production, Storage and Distribution*. Woodhead Publishing Limited, 159–185.

[https://doi: 10.1533/9780857097736.2.159](https://doi.org/10.1533/9780857097736.2.159).

/10/ Zoulias, E., Varkaraki, E. (2004) 'A review on water electrolysis', *Tcjst*, 4(2), 41–71.

<http://large.stanford.edu/courses/2012/ph240/jorna1/docs/zoulias.pdf>.

/11/ Ahn, S. H. *et al.* (2014) Development of a membrane electrode assembly for alkaline water electrolysis by direct electrodeposition of nickel on carbon papers, *Applied Catalysis B: Environmental*. Elsevier, 154–155, 197–205.

[https://doi:10.1016/J.APCATB.2014.02.021](https://doi.org/10.1016/J.APCATB.2014.02.021).

/12/ Pletcher, D. and Walsh, F. C. (1993) *Industrial Electrochemistry*. Springer Netherlands.

<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=AnL7CAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR8>

/13/ Aliexpress, (2017) Membrana de intercambio catiónico CMI 7000. Consultado el 18 de enero de 2023.

<https://es.aliexpress.com/item/1005005146128585.html>

/14/ Chisholm, G. and Cronin, L. (2016) *Hydrogen From Water Electrolysis, Storing Energy*. Elsevier Inc.

[https://doi: 10.1016/B978-0-12-803440-8.00016-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803440-8.00016-6).

/15/ Marini, S. *et al.* (2012) Advanced alkaline water electrolysis, *Electrochimica Acta*. Elsevier , 82, 384–391.

[https://doi: 10.1016/j.electacta.2012.05.011](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.05.011).

/16/ Christopher, M., Oliveira A., (1993) *Electrochemistry Principles, Methods, and Applications*. 70-197.

/17/ Bard, A., Larry, R. (2001). *Electrochemical methods fundamentals and applications*. *Departament of Chemistry and biochemistry*, 2, 87-179.

/18/ Harvey, D. (2022). *Voltamperometría cíclica*. University DePauw.

[https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_Anal%C3%ADtica/An%C3%A1lisis_Instrumental_\(LibreTextos\)/25%3A_Voltamperometr%C3%ADa/25.04%3A_Voltamperometr%C3%ADa_c%C3%ADlica](https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_Anal%C3%ADtica/An%C3%A1lisis_Instrumental_(LibreTextos)/25%3A_Voltamperometr%C3%ADa/25.04%3A_Voltamperometr%C3%ADa_c%C3%ADlica)

/19/ Arrieta, A., Tarazona, R. (2012). Sistema multipotenciostato basado en instrumentación virtual. *Ingeniería investigación y tecnología*, 15 (3), 332-333.

[https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(14\)70344-0](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(14)70344-0)

/20/ Bird, R., Stewart, W. (2002). Transport phenomena. *Chemical engineering department University of Wisconsin-Madison*, 2, 545-553.

/21/ Chang, R., College, W. (2002). Química. *McGraw-Hill*, 7, 154-175.

/22/ Mandeville, P. (2012). Diseños experimentales. *Ciencia UANL*, 15 (57), 151-155.

/23/ Douglas C. Montgomery (1976). Design and Analysis of Experiments. *John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA*, 8, 233-285.

ANEXOS

ANEXO A: CARACTERISTICAS TECNICAS DE LA MEMBRANA DE INTERCAMBIO CATIONICO CMI – 7000

Descripción de Producto

Suministramos tanto de la membrana de intercambio de cationes y aniones electrocoat de proceso y el tratamiento de aguas de las industrias. Hoy en día, membrana de intercambio de aniones es popular para la mayoría de los sistemas de CED, que es aprobado por PPG, Dupont, Valspar, Kansai y muchos otros sistemas de pintura electrolítica. Además, nuestras membranas de intercambio iónico se pueden utilizar en sistemas de electrodesionización para la producción de agua ultra pura. Tenemos tres tipos de láminas de membrana de intercambio de aniones, consulte la siguiente tabla para obtener más detalles:

Especificaciones técnicas de la membrana de intercambio catiónico:

Especificación técnica		CE1 (una sola hoja)
Funcionalidad		Ácido fuerte de la membrana de intercambio catiónico
Estructura del polímero		Cruz de poliestireno Gel vinculado con divinilbenceno
Grupo funcional		Ácido sulfónico
Como se distribuyen de forma iónica		El Sodio
El color		Brown
De tamaño estándar	: Ee. Uu.	48x 120en
	Métrica:	1, 2 m x 3, 0m
Grosor estándar	(Mils)	18±1
	(Mm)	0, 45±0.025

Resistencia eléctrica (Ohm. Cm²)	< 30
0, 5 mol/L de NaCl	
Permselectivity (%)	94
KCl 0, 1 mol/kg / 0, 5 Mol KCl/kg.	
Capacidad de intercambio total (meq/g)	1.6±0.1
Permeabilidad al agua	< 3
(MI/h/ft²) @5psi	
Fuerza de la prueba Mullen Burst (psi)	> 80
Estabilidad Térmica (°C)	90
La estabilidad química de gama (pH).	1-10
Procedimiento de pre acondicionamiento	Las membranas deben estar acondicionados mediante por inmersión en un 5% de la solución de NaCl a 40 °C Durante 24 horas para permitir la hidratación de la membrana y la expansión.

Aplicaciones:

Electro deionización para agua ultra pura en sistemas EDI y SWEDI Electro recubrimiento para sistemas de pintura catódica

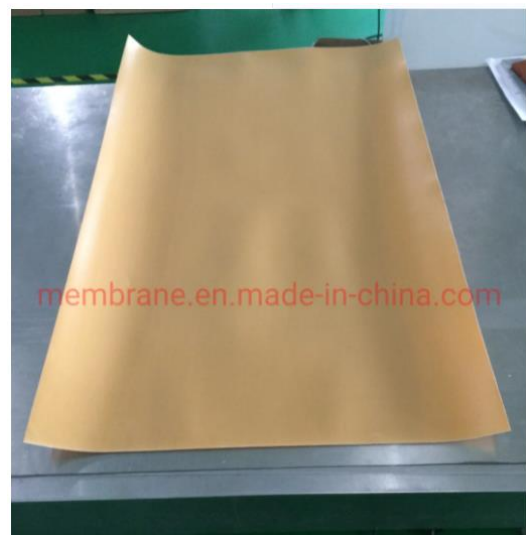
Electrólisis para celdas de combustible biológico

Electrodiálisis para desalinización y desmineralización

Galvanoplastia para recuperación de metales

Beneficios:

1. Sanitización con agua caliente Control microbiano
2. Selectividad de alta permeabilidad con baja permeabilidad
3. Nosotros puede ofrecer láminas de membrana de intercambio iónico como láminas individuales y rollos continuos.
4. Membranas siempre disponibles en stock con entrega muy rápida



ANEXO B: RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: A 23/22

Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYO EN AGUA A 23/22


Cliente:	EMPRESA FLOR DE AGUA UNIKA S.R.L.
Solicitante:	Cristian Fernando Limachi Arumi
Dirección del cliente:	Z/Renacer Colla, río Seco - El Alto
Procedencia de la muestra:	El Alto - Zona San Roque
	Provincia: Murillo
	Departamento: La Paz
Punto de muestreo:	Después del envío del agua de osmosis inversa
Responsable del muestreo:	Ing. Saúl Ilca Rojas
Fecha de muestreo:	6 de abril de 2022
Hora de muestreo:	10:30
Fecha de recepción de la muestra:	7 de abril de 2022
Fecha de ejecución del ensayo:	Del 7 al 20 de abril, 2022
Caracterización de la muestra:	Agua de Osmosis inversa
Tipo de muestra:	Simple
Envase:	Botella Pet
Código LCA:	23- 1
Código original:	Agua de Osmosis inv.

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Limite de determinación	Agua de Osmosis inv. 23- 1
Alcalinidad total	EPA 310.1	mg CaCO ₃ /l	5.0	15
Bicarbonatos	EPA 310.1	mg/l	6.0	14.9
Calcio	EPA 215.1	mg/l	0.32	3.9
Cloruros	SM-4500-Cl--B	mg Cl/l	0.020	3.1
Coliformes totales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2.0	< 2.0
Conductividad eléctrica	EPA 120.1	µS/cm	1.0	79
Dureza total	SM 2340 - B	mg CaCO ₃ /l	2.0	18
Magnesio	EPA 242.1	mg/l	0.18	2.0
pH	EPA 150.1		1 - 14	7.6
Potasio	EPA 258.1	mg/l	0.21	1.5
Sodio	EPA 273.1	mg/l	0.019	7
Sólidos totales	EPA 160.3	mg/l	10	42
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0.10	0.59

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)
Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, 22 de Abril de 2022


Ing. Jaime Chincheros Panigagua
Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



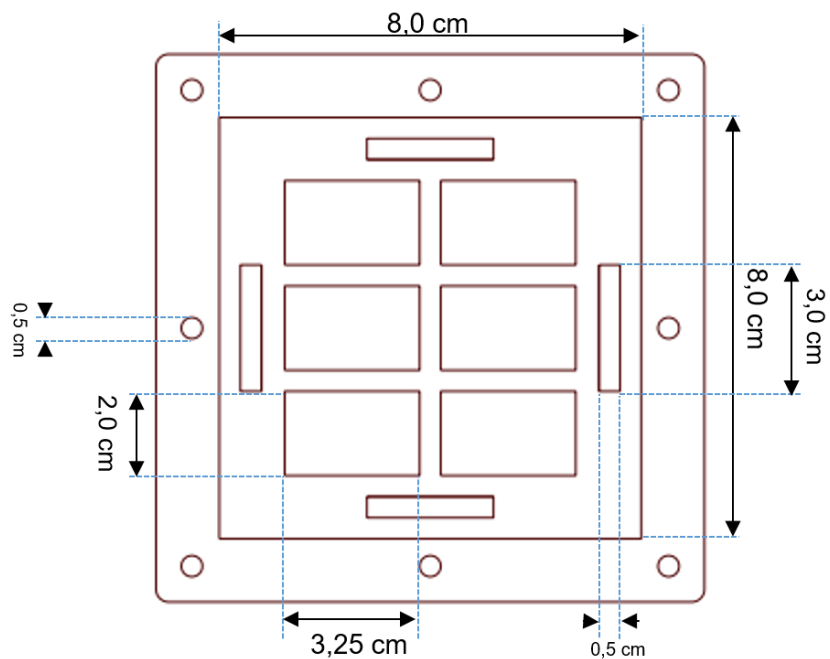
JCH/LCA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

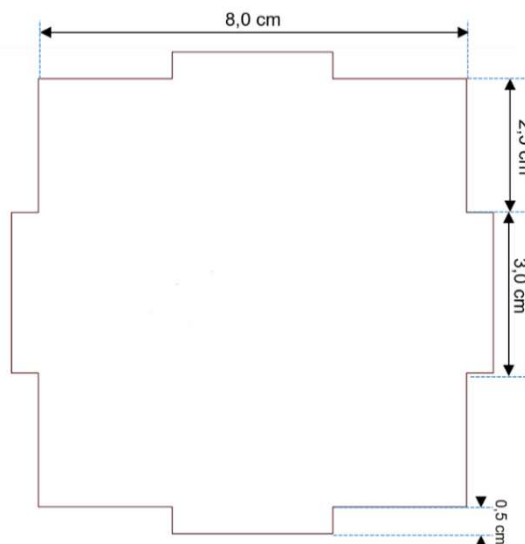
ANEXO C: DISEÑO DE PLANOS Y MEDIDAS DE LA CELDA PARA SU CONSTRUCCIÓN

El diseño de planos se lo realizó en el Programa Vector Works

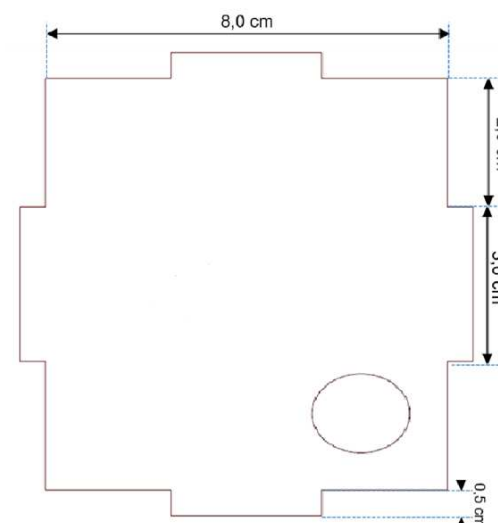
Parte central de la celda donde se instaló la membrana, 2 piezas



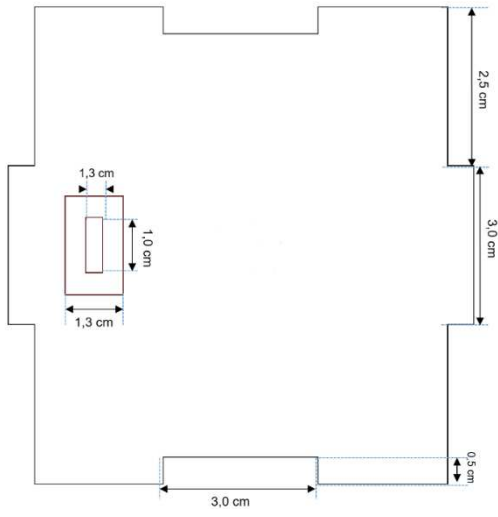
Parte de la pared de fondo de la celda, 2 piezas



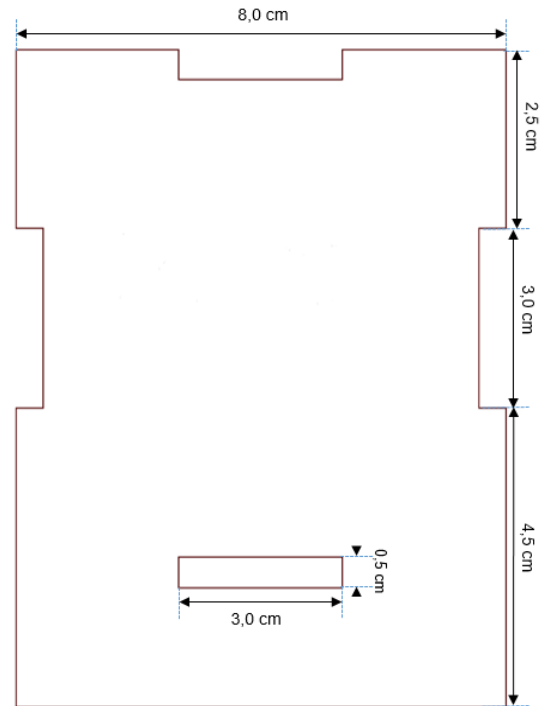
Parte superior de la pared, 2 piezas





Parte inferior de la pared, 2 piezas



Parte de perfil lateral de la pared, 2 piezas



ANEXO D: NORMA BOLIVIANA NB 512:2016 REQUISITOS AGUA POTABLE

Norma Boliviana	NB 512
Ministerio de Medio Ambiente y Agua Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico	
AGUA POTABLE Requisitos	
ICS 13.06020 Agua Potable CTN Nº 3.1 - Agua Potable	
Quinta revisión 2016 - 06 - 2017 Número de Referencia NB: 512: 2016	
Instituto Boliviano de Normalización y Calidad	 IBNORCA Instituto Boliviano de Normalización y Calidad

ANEXO E: CÁLCULOS DE PARÁMETROS ELECTROQUÍMICOS INICIALES

$$E_{celda} = E_{rev}^0 + \sum \eta_{sobrepotencial} + I * R_{celda} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Con la ecuación 2.2, se calcula el potencial a la temperatura del sistema

$$E_{rev}^0 = E^0 - \frac{R * T}{n * F} * \ln \left(\frac{[Red]^b}{[Ox]^a} \right) \quad \text{Ecuación 2.2}$$

$$T = 15 \text{ } ^\circ\text{C} = 288 \text{ K}$$

$$R = 8,314 \text{ J/molK}$$

$$n = 4$$

$$E^0 = 1,23 \text{ V}$$

$$F = 96485 \text{ C/mol}$$

$$[Red] = [H^+] = 10^{(-7,6)} \text{ M}$$

$$[Ox] = [OH^-] = 10^{(-6,4)} \text{ M}$$

Reemplazando los datos en la ecuación 2.2, se tiene:

$$E_{rev}^0(15^\circ\text{C}) = 1,48 \text{ V}$$

Con la ecuación 2.11:

$$R_{celda} = R_{conectores} + R_{anodo} + R_{catodo} + R_{Burb.H2} + R_{Burb.O2} + R_{electrolito} + R_{membrana} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

$$R_{conectores} = 2,4 \text{ ohm}$$

$$R_{ánodo} = 4,3 \text{ ohm}$$

$$R_{cátodo} = 4,4 \text{ ohm}$$

$$R_{electrolito} = \rho * (L/A) = L / (k * A) = (2\text{cm} * 1\mu\text{S}) / (79\mu\text{S/cm} * 64 \text{ cm}^2 * 10^{(-6)} \text{ S})$$

$$R_{electrolito} = 395,6 \text{ ohm}$$

$$R_{membrana} = (30 \text{ ohm} * \text{cm}^2) / 64 \text{ cm}^2$$

$$R_{membrana} = 0,47 \text{ ohm}$$

Calculo de los sobrepotenciales “ η ”

- Para el cátodo con la ley de Tafel:

$$\ln i = \ln i_0 - \frac{\alpha n F}{RT} \eta$$

Donde:

$$\ln(i_0) = -4,6432$$

$$\alpha = 0,76$$

$$n = 4$$

$$i = 1 \text{ A}$$

Reemplazando los datos en la ecuación, resulta:

$$\eta(\text{cátodo}) = 0,98 \text{ V}$$

Con la ecuación de Tafel:

$$\ln i = \ln i_0 + \frac{(1 - \alpha)nF}{RT} \eta$$

Donde

$$\ln(i_0) = -4,8369$$

$$\alpha = 0,76$$

$$n = 2$$

$$i = 1 \text{ A}$$

Reemplazando los datos en la ecuación, resulta:

$$\eta(\text{ánodo}) = 0,24 \text{ V}$$

Calculando E_{celda} en la ecuación 2.10, considerando intensidad mínima que entrega la fuente de poder CC de 0,01 A

$$E_{\text{celda}} = 1,48 + 0,98 + 0,25 + 0,01 * (407,2)$$

$$E_{\text{celda}} = 6,77 \text{ V}$$

ANEXO F: DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS DURANTE LA OBTENCIÓN DEL AGUA ALCALINA IONIZADA

fecha:	9/5/2022							
	DATOS							
	agua de alimentacion							
	T(°C)	15,2						
	pH	7,6						
	k (uS/cm)	79						
	TDS (ppm)	42						
	ORP(mV)	184						
Experimento	a V=11,5 v	I = 0,75 A						
		agua alcalina			AGUA ACIDA			
t(min)	pH	k	TDS	ORP	pH	k	TDS	ORP
5	7,62	81	42	178	6,71	92	46	354
10	7,65	83	42	174	7,03	68	34	324
15	7,78	86	44	165	7,09	68	35	314
20	7,89	91	45	143	7,1	70	35	316
25	8,11	95	48	115	6,91	71	35	305
30	8,76	97	49	28	6,67	71	35	327
35	8,95	101	51	-14	6,72	51	28	347
40	9,34	106	54	-29	5,92	47	25	370
45	9,78	114	57	-89	5,11	45	23	385

					PRODUCCION DE AGUA ALCALINA IONIZADA			
fecha:	16/5/2022							
	DATOS							
	agua de alimentacion							
	T(°C)	14,6						
	pH	7,6						
	k (uS/cm)	79						
	TDS (ppm)	42						
	ORP(mV)	184						
Experimento	a V=24 v	I= 0,70 A						
		agua alcalina			AGUA ACIDA			
t(min)	pH	k	TDS	ORP	pH	k	TDS	ORP
5	7,6	80	42	183	7,55	78	39	195
10	8,51	89	44	85	7,27	75	38	211
15	9,25	96	48	-38	7,1	73	37	222
20	9,78	101	51	-85	6,9	68	34	231
25	10,23	108	55	-114	6,7	65	33	265
30	10,81	117	59	-126	6,4	62	31	278
35	11,42	122	62	-148	5,9	54	27	286

					PRODUCCION DE AGUA ALCALINA IONIZADA			
fecha:	18/5/2022							
	DATOS							
	agua de alimentacion							
	T(°C)	16,5						
	pH	7,6						
	k (uS/cm)	79						
	TDS (ppm)	42						
	ORP(mV)	184						
Experimento	a V=20 v	I= 0,65 A						
		agua alcalina			AGUA ACIDA			
t(min)	pH	k	TDS	ORP	pH	k	TDS	ORP
5	7,66	80	42	176	7,55	73	36	148
10	7,82	81	42	153	7,52	71	36	152
15	8,4	85	43	114	7,35	75	37	156
20	8,85	89	44	28	7,27	75	38	57
25	9,14	94	47	-43	7,22	103	51	63
30	9,98	117	49	-80	7,77	103	51	86
35	10,16	121	61	-106	7,25	98	48	105
40	10,54	134	67	-156	7,54	98	48	122
45	10,76	143	72	-177	4,48	109	55	333

		PRODUCCION DE AGUA ALCALINA IONIZADA							
fecha:	17/5/2022								
	DATOS								
	agua de alimentacion								
	T(°C)	17							
	pH	7,6							
	k (uS/cm)	79							
	TDS (ppm)	42							
	ORP(mV)	184							
Experimento	a V=5 v	I= 2 A							
		agua alcalina			AGUA ACIDA				
t(min)	pH	k	TDS	ORP	pH	k	TDS	ORP	
5	7,62	79	42	178	7,12	73	36	189	
10	7,71	79	41	175	7,09	71	36	198	
15	7,78	79	42	168	6,9	67	34	201	
20	7,84	81	42	154	6,7	65	32	204	
25	7,86	81	42	146	6,4	61	31	211	
30	7,91	83	43	126	6,2	57	29	215	
35	7,97	86	43	97	5,9	55	27	221	
40	8,04	88	45	28	5,7	52	26	231	
45	8,45	95	47	-18	5,5	48	24	243	
50	9,28	101	51	-37	5,3	46	23	246	
55	9,67	108	54	-58	5,1	43	22	256	

		PRODUCCION DE AGUA ALCALINA IONIZADA							
fecha:	17/5/2022								
	DATOS								
	agua de alimentacion								
	T(°C)	15,5							
	pH	7,6							
	k (uS/cm)	79							
	TDS (ppm)	42							
	ORP(mV)	184							
Experimento	a V= 7 v	I= 1,5 A							
		agua alcalina			AGUA ACIDA				
t(min)	pH	k	TDS	ORP	pH	k	TDS	ORP	
5	7,6	79	42	182	7,12	73	40	187	
10	7,61	79	42	179	7,09	71	39	189	
15	7,61	80	42	179	6,9	68+	37	197	
20	7,63	81	43	168	6,7	67	35	201	
25	7,68	81	43	167	6,5	64	34	208	
30	7,71	83	43	158	6,2	62	33	214	
35	7,83	86	44	156	5,9	61	31	216	
40	7,84	86	44	148	5,8	58	29	218	
45	7,89	88	45	137	5,5	57	28	221	
50	7,94	89	47	118	5,4	55	26	225	
55	8,43	93	47	57	5,2	53	26	227	
60	8,89	95	49	-8	5,1	51	25	234	
65	9,42	102	52	-66	4,8	48	24	245	

		PRODUCCION DE AGUA ALCALINA IONIZADA							
fecha:	27/5/2022								
	DATOS								
	agua de alimentacion								
	T(°C)	15,5							
	pH	7,6							
	k (uS/cm)	79							
	TDS (ppm)	42							
	ORP(mV)	184							
Experimento	a V= 25 v	I= 3 A							
		agua alcalina			AGUA ACIDA				
t(min)	pH	k	TDS	ORP	pH	k	TDS	ORP	
5	7,97	80	43	149	7,45	102	50	145	
10	8,6	83	46	115	7,95	83	41	153	
15	9,25	88	46	-14	7,96	82	41	163	
20	10,14	93	48	-29	7,97	83	41	165	
25	10,56	97	50	-57	8,02	83	41	169	
30	10,78	104	52	-78	7,96	83	41	170	
35	11,23	114	58	-101	8,02	91	45	171	

		PRODUCCION DE AGUA ALCALINA IONIZADA							
fecha:	5/5/2022								
	DATOS								
	agua de alimentacion								
	T(°C)	17,1							
	pH	7,6							
	k (uS/cm)	79							
	TDS (ppm)	42							
	ORP(mV)	184							
Experimento	a V= 10 v	I= 0,80 A							
		agua alcalina			AGUA ACIDA				
t(min)	pH	k	TDS	ORP	pH	k	TDS	ORP	
5	7,64	79	42	184	6,97	79	40	189	
10	7,72	80	42	178	6,97	79	38	195	
15	7,73	80	43	167	6,97	79	36	198	
20	7,94	82	45	145	6,97	79	33	208	
25	8,05	86	45	142	6,97	77	32	244	
30	8,24	94	47	128	6,97	77	30	265	
35	8,89	97	49	97	6,97	77	29	276	
40	9,28	103	52	-28	6,97	77	27	289	
45	9,88	114	57	-87	6,97	77	25	296	

		PRODUCCION DE AGUA ALCALINA IONIZADA							
fecha:	10/6/2022								
	DATOS								
	agua de alimentacion								
	T(°C)	14,5							
	pH	7,6							
	k (uS/cm)	79							
	TDS (ppm)	42							
	ORP(mV)	184							
Experimento	a V= 20,5v	I= 1,2 A							
		agua alcalina			AGUA ACIDA				
t(min)	pH	k	TDS	ORP	pH	k	TDS	ORP	
5	7,63	85	43	175	7,3	78	39	118	
10	8,2	88	44	102	7,1	74	37	134	
15	8,93	103	51	27	6,56	71	35	143	
20	9,86	149	74	-98	6,05	67	33	205	
25	10,11	155	78	-120	5,38	57	29	286	
30	10,54	162	82	-145	4,96	55	28	356	
35	10,78	173	86	-168	4,89	53	26	358	

		PRODUCCION DE AGUA ALCALINA IONIZADA							
fecha:	31/5/2022								
	DATOS								
	agua de alimentacion								
	T(°C)	15,3							
	pH	7,6							
	k (uS/cm)	79							
	TDS (ppm)	42							
	ORP(mV)	184							
Experimento	a V= 15 v	I= 0,90 A							
		agua alcalina			AGUA ACIDA				
t(min)	pH	k	TDS	ORP	pH	k	TDS	ORP	
5	8,02	80	42	125	7,3	75	40	88	
10	8,12	82	42	108	7,1	72	37	134	
15	8,78	83	44	32	6,8	68	34	143	
20	8,89	86	44	-27	6,7	66	33	157	
25	9,11	91	46	-55	6,5	62	31	167	
30	9,78	96	48	-82	6,2	59	29	175	
35	9,89	106	53	-93	5,9	55	27	178	
40	10,14	117	59	-105	5,3	48	24	178	

ANEXO G

DISEÑO EXPERIMENTAL

OBTENCIÓN DE AGUA ALCALINA IONIZADA A PARTIR DE AGUA DE OSMOSIS INVERSA,
MEDIANTE EL PROCESO DE LA ELECTROLISIS

Los factores a analizarse para este experimento fueron: el tiempo de duración del proceso en minutos, el voltaje usado en el proceso en voltios y la intensidad en amperios.

factores	Efectos	min	máx.
tiempo, min	A	20	30
voltaje, V	B	5	24
Intensidad, A	C	0,5	1

Se ha considerado que para un mejor análisis del experimento se mida y estudie por lo menos 3 respuestas las cuales son: pH, ORP en mV y el costo del proceso en Bs.

Para este estudio se utilizó el diseño factorial 2^K siendo K la cantidad de factores a analizarse en 2 niveles cada uno.

Se harán 8 tratamientos diferentes más una réplica por lo cual se realizará 16 tratamientos con los cuales se estudiarán los efectos principales A, B, C; tres interacciones dobles AB, AC, BC y una interacción triple ABC.

Para construir la matriz de diseño se utilizará el software Design Expert en su versión 13, la cual resulta de la siguiente manera:

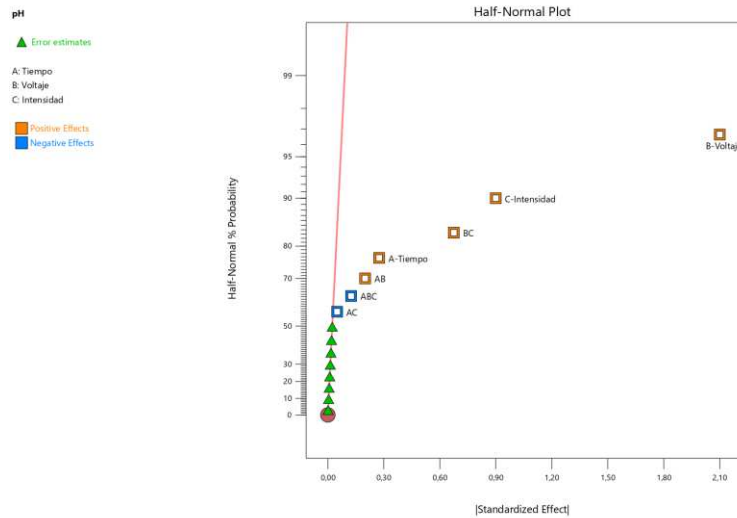
Std	Orden Corrida	Tiempo (min)	Voltaje (V)	Intensidad (A)	pH	C.E. (uS)	ORP (mV)	costo x10 ⁻³ (Bs)
1	1	20	5	0,5	7,6	79	181	6,658
11	2	30	5	1	7,9	84	176	19,975
14	3	20	24	1	10,4	117	-228	63,920
5	4	20	24	0,5	8,6	91	-58	31,960
9	5	20	5	1	7,8	82	182	13,317
3	6	30	5	0,5	7,6	81	177	9,988
6	7	20	24	0,5	8,8	92	-61	31,960
13	8	20	24	1	10,5	138	-235	63,920
16	9	30	24	1	10,7	111	-224	95,880
12	10	30	5	1	7,9	84	178	19,975
7	11	30	24	0,5	9,4	98	-185	47,940
8	12	30	24	0,5	9,3	101	-164	47,940
15	13	30	24	1	10,8	142	-268	95,880
2	14	20	5	0,5	7,6	79	103	6,658
10	15	20	5	1	7,7	83	184	13,317
4	16	30	5	0,5	7,6	80	182	9,988

En la cual las corridas están configuradas de forma aleatoria, y se procede a rellenar la tabla con las respuestas obtenidas de pH, ORP, Costo.

ANÁLISIS DE RESULTADOS DEVUELTOS

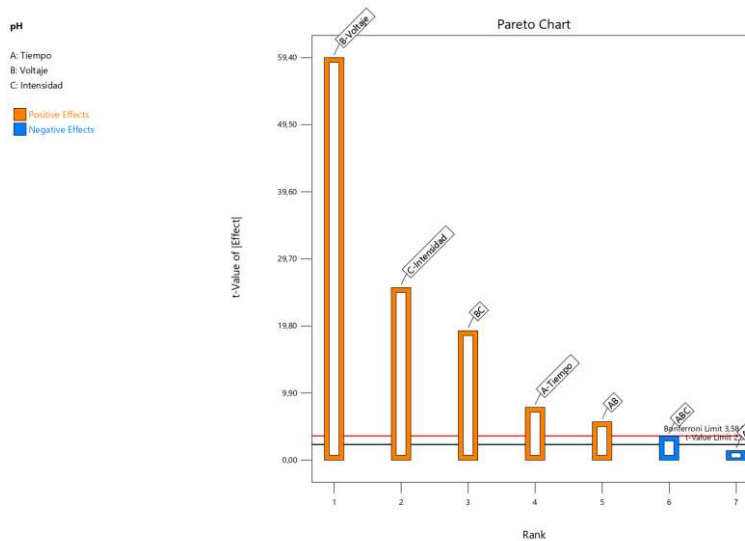
Análisis de pH

Determinando efectos e interacciones significativas para la construcción del modelo



Esta grafica media normal nos muestra que tan significativo es un efecto principal o la interacción entre 2 o más de estos.

Mientras más alejado se encuentra un efectos o interacción de la recta de color rojo mas significativo es para la construcción del modelo.



Esta es la gráfica de Pareto la cual nos indica de igual manera mediante 2 limites; limite valor- $t=2.32$ y limite de Bonferroni= 3.58 , que efectos o interacciones son significativas para la construcción del modelo, en este caso la interacción AC es la menos significativa para el modelo.

ANOVA del modelo factorial seleccionado

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	23,24	7	3,32	663,93	< 0.0001	significant
A-Tiempo	0,3025	1	0,3025	60,5	< 0.0001	
B-Voltaje	17,64	1	17,64	3528	< 0.0001	
C-Intensidad	3,24	1	3,24	648	< 0.0001	
AB	0,16	1	0,16	32	0,0005	
AC	0,01	1	0,01	2	0,195	
BC	1,82	1	1,82	364,5	< 0.0001	
ABC	0,0625	1	0,0625	12,5	0,0077	

De la tabla entregada por Design Expert nos interesa la interpretación del valor F y el valor P.

El **valor F** del modelo de 663,93 implica que el modelo es significativo. Solo hay una probabilidad del 0,01 % de que se produzca un valor F tan grande debido al ruido.

Los **valores de P** inferiores a 0,0500 indican que los términos del modelo son significativos. En este caso A, B, C, AB, BC, ABC son términos significativos del modelo. Los valores superiores a 0,1000 indican que los términos del modelo no son significativos, como se había visto en las gráficas anteriores BC.

También se puede observar la siguiente tabla:

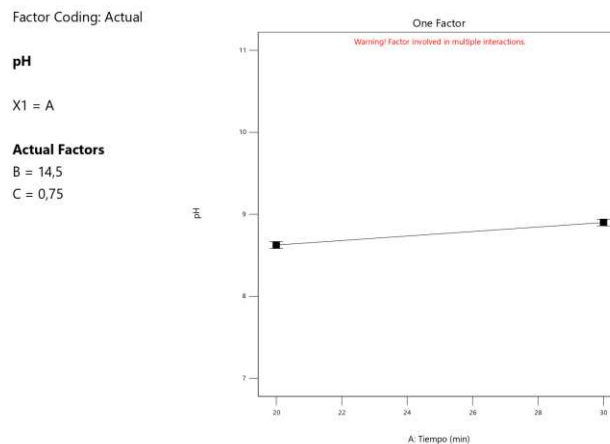
Std. Dev.	0,0707	R²	0,9983
Mean	8,76	Adjusted R²	0,9968
C.V. %	0,807	Predicted R²	0,9931
		Adeq Precision	63

El R² Pronosticado de 0,9931 está razonablemente de acuerdo con el R² Ajustado de 0,9968; es decir, la diferencia es inferior a 0,2.

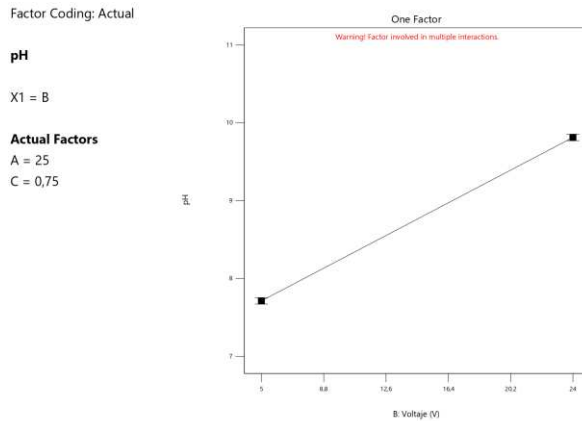
Adeq Precision mide la relación señal/ruido. Es deseable una relación superior a 4. la proporción de 63.000 indica una señal adecuada.

Análisis de los efectos principales y sus interacciones

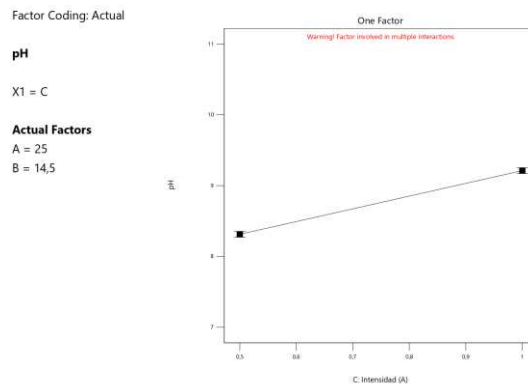
Efectos principales



De la primera grafica podemos observar que, si el aumento de pH solo dependiera del efecto del tiempo manteniendo un valor de voltaje e intensidad constantes, se produciría un aumento de pH muy poco significativo y por lo cual no podemos depender solo de este efecto para la realización del experimento.



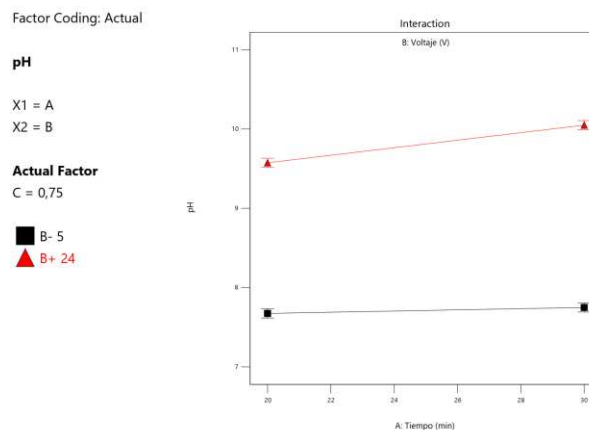
De la gráfica anterior podemos interpretar que el voltaje produce un cambio muy significativo en el aumento del valor de pH, todo ello manteniendo constantes al tiempo y a la intensidad.



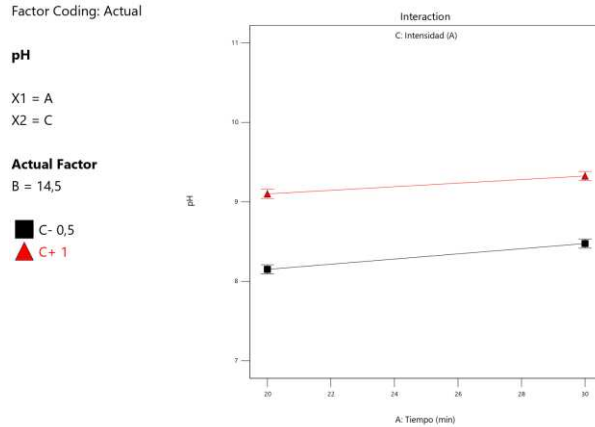
De la gráfica anterior que el efecto de la intensidad en el aumento de pH es significativo para la construcción de modelo, manteniendo voltaje y tiempo constantes.

Según las gráficas anteriores se podría decir que el efecto del voltaje y de la intensidad son los efectos más importantes para el proceso de obtención de agua alcalina.

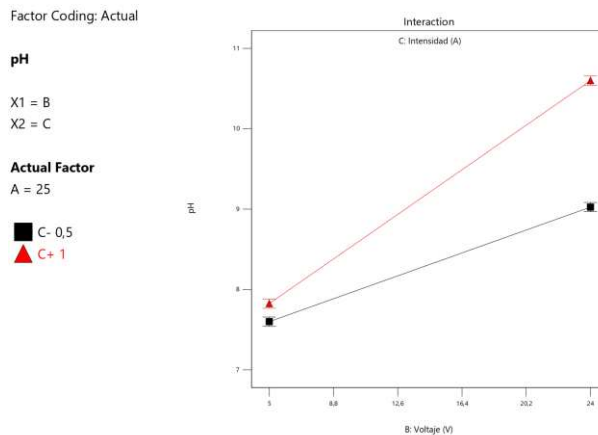
Interacciones de efectos



Esta grafica nos muestra la diferencia de trabajar con voltaje de 5V y 24V, podemos ver que el aumento de pH es favorecido mucho más al usar 24V, también podemos observar que trabajar con 24V a en un tiempo de 30 minutos no es muy significativo que hacerlo con un tiempo de 20 minutos.



Esta grafica nos muestra que es mejor trabajar con una intensidad de 1 amperio que con 0.5 amperios, esto favorece al aumento de pH significativamente, también podemos observar que al trabajar con 1 amperio hay poca diferencia en el aumento de pH realizando el proceso por 20 minutos o por 30 minutos.



En la gráfica anterior podemos observar la interacción más significativa del proceso pues podemos observar que no solo trabajar con 1 amperio en intensidad es muy conveniente si que al aumentar el voltaje de 5 a 24V a la vez que aumentamos la intensidad produce muy buenos resultados en el aumento de pH.

Ecuación final

Luego del análisis de validación del modelo y el estudio de significancia de los efectos principales y sus interacciones en el diseño experimental el design expert nos presenta la ecuación siguiente:

$$\text{pH} = 8,48684 - 0,0452632 * A - 0,147368 * B - 1,66842 * C + 0,00605263 * AB + 0,0563158 * AC + 0,273684 * BC - 0,00526316 * ABC$$

Donde:

A = Tiempo [minutos]

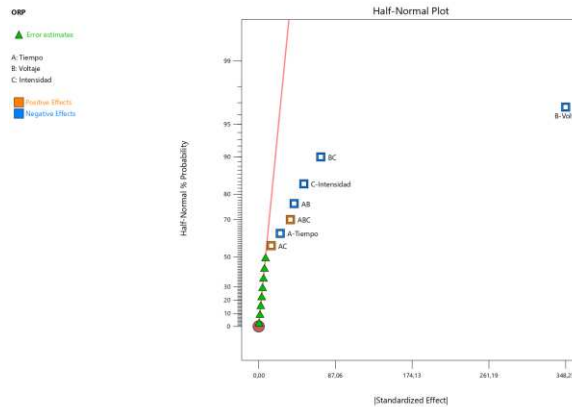
B = Voltaje [Voltios]

C = Intensidad [Amperios]

La ecuación anterior nos ayudara a predecir el valor del pH de acuerdo a los cambios que necesitemos realizar en los valores A, B, C.

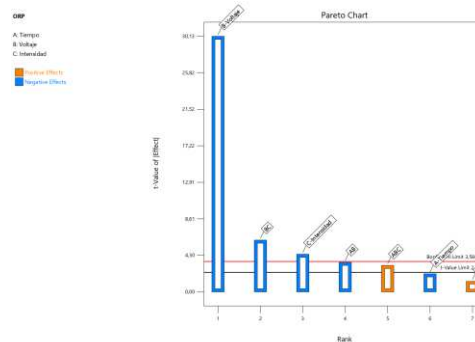
Análisis de ORP

Determinando efectos e interacciones significativas para la construcción del modelo



Esta grafica media normal nos muestra que tan significativo es un efecto principal o la interacción entre 2 o más de estos.

Mientras más alejado se encuentra un efecto o interacción de la recta de color rojo más significativo es para la construcción del modelo.



Esta es la gráfica de Pareto la cual nos indica de igual manera mediante 2 límites; límite valor- $t=2.32$ y límite de Bonferroni= 3.58 , que efectos o interacciones son significativas para la construcción del modelo, en este caso la interacción AC es la menos significativa para el modelo.

ANOVA del modelo factorial seleccionado

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	5,30E+05	7	75768,14	141,76	< 0.0001	significant
A-Tiempo	2401	1	2401	4,49	0,0669	
B-Voltaje	4,85E+05	1	4,85E+05	907,6	< 0.0001	
C-Intensidad	10506,25	1	10506,25	19,66	0,0022	
AB	6480,25	1	6480,25	12,12	0,0083	
AC	812,25	1	812,25	1,52	0,2527	
BC	19881	1	19881	37,2	0,0003	
ABC	5184	1	5184	9,7	0,0144	

De la tabla entregada por Design Expert nos interesa la interpretación del valor F y el valor P.

El **valor F** del modelo de 141,76 implica que el modelo es significativo. Solo hay una probabilidad del 0,01 % de que se produzca un valor F tan grande debido al ruido.

Los **valores de P** inferiores a 0,0500 indican que los términos del modelo son significativos. En este caso B, C, AB, BC, ABC son términos significativos del modelo. Los valores superiores a 0,1000 indican que los términos del modelo no son significativos, como se había visto en las gráficas anteriores A, BC.

También se puede observar la siguiente tabla:

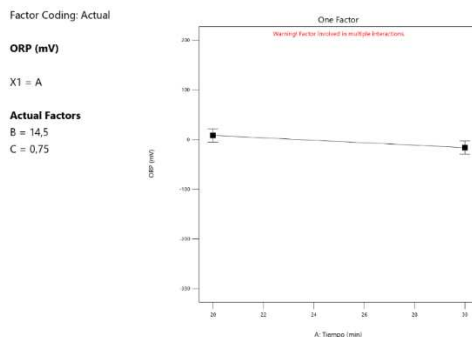
Std. Dev.	23,12	R²	0,992
Mean	-3,75	Adjusted R²	0,985
C.V. %	616,51	Predicted R²	0,968
		Adeq Precision	26,2421

El R² Pronosticado de 0,968 está razonablemente de acuerdo con el R² Ajustado de 0,985; es decir, la diferencia es inferior a 0,2.

Adeq Precision mide la relación señal/ruido. Es deseable una relación superior a 4. la proporción de 26,2421 indica una señal adecuada.

Análisis de los efectos principales y sus interacciones

Efectos principales



De la primera gráfica podemos observar que, si la disminución de ORP solo dependiera del efecto del tiempo manteniendo un valor de voltaje e intensidad constantes, se encontrarían cambios muy poco significativos y por lo cual no podemos depender solo de este efecto para la realización del experimento.

Factor Coding: Actual

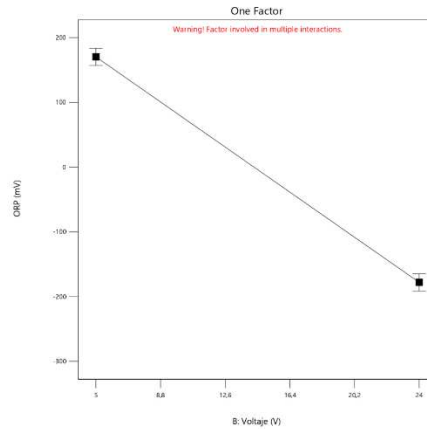
ORP (mV)

X1 = B

Actual Factors

A = 25

C = 0,75



De la gráfica anterior podemos interpretar que el voltaje produce un cambio muy significativo en la disminución del valor de ORP, todo ello manteniendo constantes al tiempo y a la intensidad.

Factor Coding: Actual

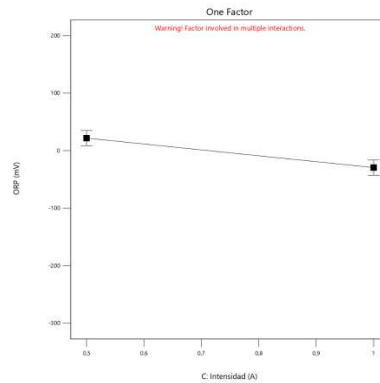
ORP (mV)

X1 = C

Actual Factors

A = 25

B = 14,5



De la gráfica anterior que el efecto de la intensidad en la disminución del valor de ORP es significativo para la construcción de modelo, manteniendo voltaje y tiempo constantes.

Según las gráficas anteriores se podría decir que el efecto del voltaje y de la intensidad son los efectos más importantes para el proceso de obtención de agua alcalina.

Interacciones de efectos

Factor Coding: Actual

ORP (mV)

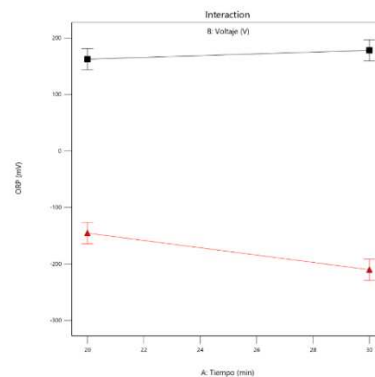
X1 = A

X2 = B

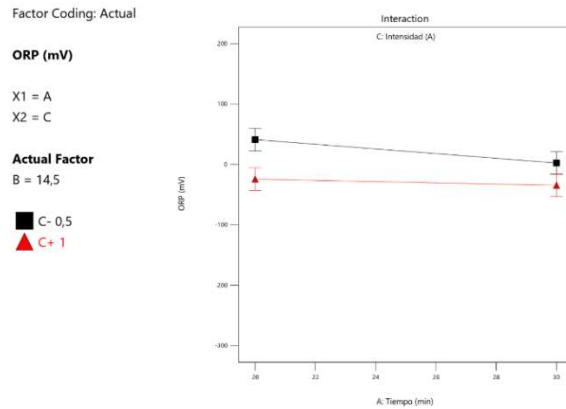
Actual Factor

C = 0,75

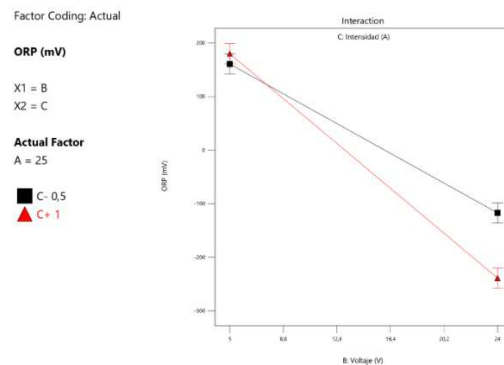
■ B- 5
▲ B+ 24



Esta gráfica nos muestra la diferencia de trabajar con voltaje de 5V y 24V, podemos ver que la disminución de ORP es favorecido mucho más al usar 24V, también podemos observar que trabajar con 24V a en un tiempo de 30 minutos a comparación de un tiempo de 20 minutos resulta significativo.



Esta gráfica nos muestra que trabajar con una intensidad de 1 amperio nos es mucho mejor que trabajar con 0.5 amperios, especialmente en tiempos mayores a 30 minutos, también podemos observar que al trabajar con 1 amperio hay poca diferencia en la disminución de ORP realizando el proceso por 20 minutos o por 30 minutos.



En la gráfica anterior podemos observar la interacción que trabajar con 0,5 a 1 amperio produce resultados muy significativos para el proceso, pues realizando una buena combinación de voltaje de 5 a 24V podremos reducir el valor de ORP de la forma requerida.

Ecuación final

Luego del análisis de validación del modelo y el estudio de significancia de los efectos principales y sus interacciones en el diseño experimental, design expert nos presenta la ecuación siguiente:

$$\text{ORP} = -220,079 + 15,9026 * A + 31,8158 * B + 519,684 * C - 1,56053 * AB - 16,2789 * AC - 52,7368 * BC + 1,51579 * ABC$$

Donde:

A = Tiempo [minutos]

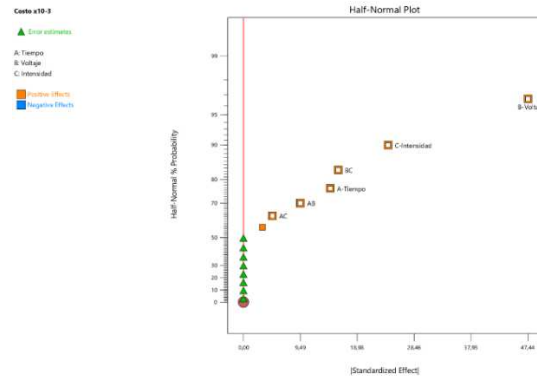
B = Voltaje [Voltios]

C = Intensidad [Amperios]

La ecuación anterior nos ayudara a predecir el valor de ORP de acuerdo a los cambios que necesitemos realizar en los valores A, B, C.

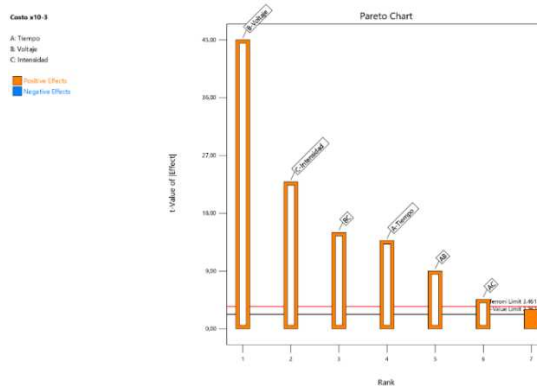
Análisis de Costos

Determinando efectos e interacciones significativas para la construcción del modelo



Esta gráfica media normal nos muestra que tan significativo es un efecto principal o la interacción entre 2 o más de estos.

Mientras más alejado se encuentra efectos o interacción de la recta de color rojo más significativo es para la construcción del modelo. Podemos ver que las interacciones son más significativas para el análisis de costos que para el pH o el ORP, excepto la interacción ABC.



Esta es la gráfica de Pareto la cual nos indica de igual manera mediante 2 limites; limite valor-t=2.32 y limite de Bonferroni=3.58, que efectos o interacciones son significativas para la construcción del modelo, en este caso podemos observar que todos los efectos principales y las interacciones son significativas pues superan los límites establecidos, pero para mejorar el análisis del modelo se descartara la interacción ABC.

ANOVA del modelo factorial seleccionado

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	13625,21	6	2270,87	510,81	< 0.0001	significant
A-Tiempo	838,9	1	838,9	188,7	< 0.0001	
B-Voltaje	9002,45	1	9002,45	2025	< 0.0001	
C-Intensidad	2330,27	1	2330,27	524,17	< 0.0001	
AB	360,1	1	360,1	81	< 0.0001	
AC	93,21	1	93,21	20,97	0,0013	
BC	1000,27	1	1000,27	225	< 0.0001	

De la tabla entregada por Design Expert nos interesa la interpretación del valor F y el valor P.

El **valor F** del modelo de 510,81 implica que el modelo es significativo. Solo hay una probabilidad del 0,01 % de que se produzca un valor F tan grande debido al ruido.

Los **valores de P** inferiores a 0,0500 indican que los términos del modelo son significativos. En este caso A, B, C, AB, BC, AC son términos significativos del modelo. Los valores superiores a 0,1000 indican que los términos del modelo no son significativos, como se había visto en las gráficas anteriores ABC.

También se puede observar la siguiente tabla:

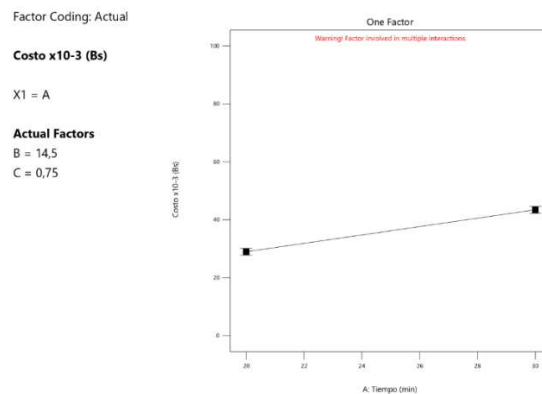
Std. Dev.	2,11		R²	0,9971
Mean	36,2		Adjusted R²	0,9951
C.V. %	5,82		Predicted R²	0,9907
			Adeq Precision	61,7077

El R² Pronosticado de 0,9907 está razonablemente de acuerdo con el R² Ajustado de 0,9951; es decir, la diferencia es inferior a 0,2.

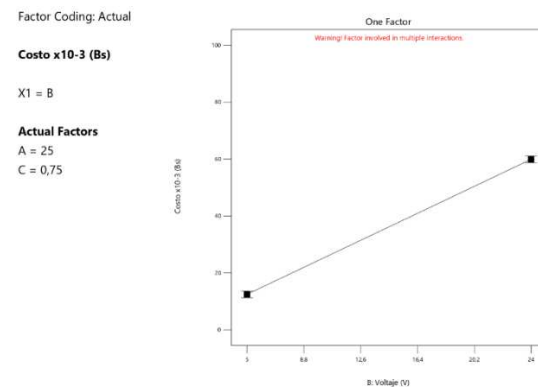
Adeq Precision mide la relación señal/ruido. Es deseable una relación superior a 4. la proporción de 61,7077 indica una señal adecuada.

Análisis de los efectos principales y sus interacciones

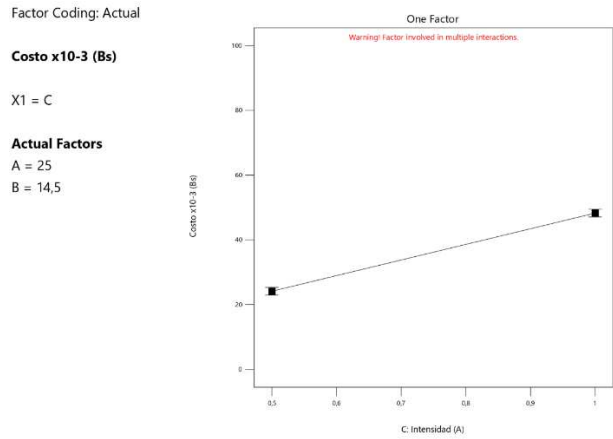
Efectos principales



De la primera grafica podemos observar que, que el aumento en el costo mantenido un V = 14,5V y una I = 0,75A, es algo significativo como podría haberse esperado.



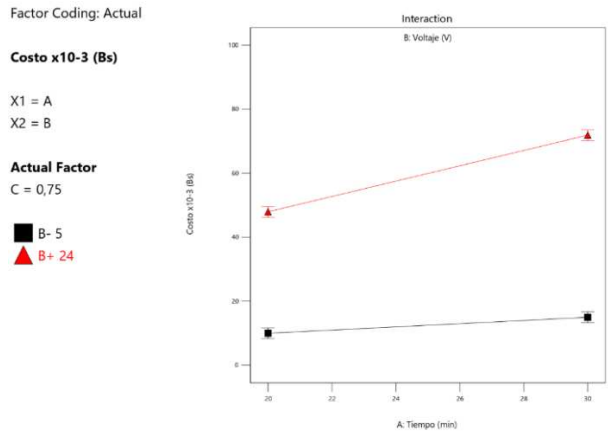
De la gráfica anterior podemos interpretar que el costo de operación aumenta muy significativamente con el incremento del voltaje, mucho más que con la variación de tiempo.



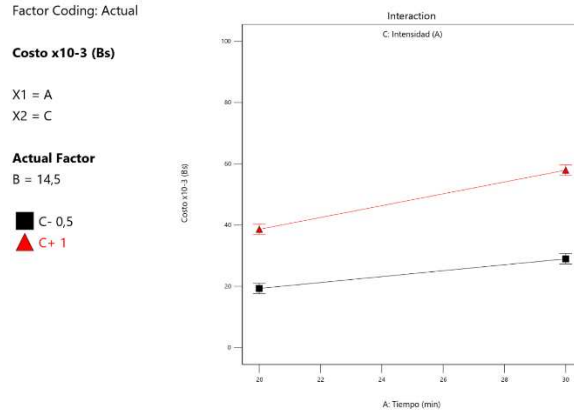
De la gráfica anterior que el efecto de la intensidad es el segundo efecto más significativo para el aumento de costo del proceso.

Según las gráficas anteriores se podría decir que el efecto del voltaje y de la intensidad son los efectos más importantes para el costo del proceso de obtención de agua alcalina.

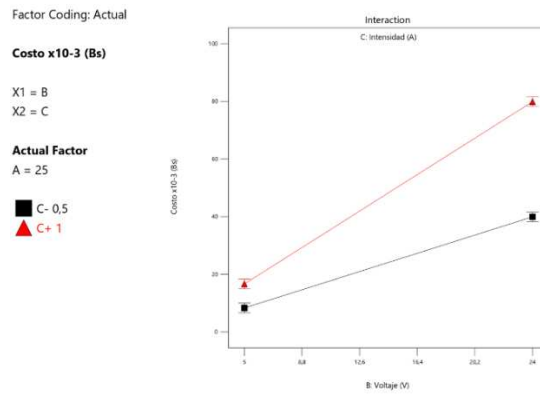
Interacciones de efectos



Esta grafica nos muestra la diferencia de trabajar con voltaje de 5V y 24V, podemos ver que el costo del proceso aumenta significativamente al usar 24V, también podemos observar que trabajar con 24V a en un tiempo de 30 minutos a comparación de un tiempo de 20 minutos resulta muy significativo.



Esta grafica nos muestra que trabajar con una intensidad de 1 amperio es más costoso que trabajar con 0.5 amperios, especialmente en tiempos mayores a 30 minutos, también podemos observar que al trabajar con 1 amperio hay un aumento del costo significativo mientras más aumenta el tiempo del proceso.



En la gráfica anterior podemos observar la interacción que trabajar con 0,5 a 1 amperio produce resultados muy significativos para el costo del proceso, pues realizando una buena combinación de intensidad con voltaje podremos reducir el costo del proceso de obtención de agua alcalina.

Ecuación final

Luego del análisis de validación del modelo y el estudio de significancia de los efectos principales y sus interacciones en el diseño experimental, design expert nos presenta la ecuación siguiente:

$$\text{Costo} \times 10^{-3} = 36,2047 + -1,44819 * A + -2,49687 * B + -48,2729 * C + 0,099875 * AB + 1,93092 * AC + 3,32917 * BC$$

Donde:

A = Tiempo [minutos]

B = Voltaje [Voltios]

C = Intensidad [Amperios]

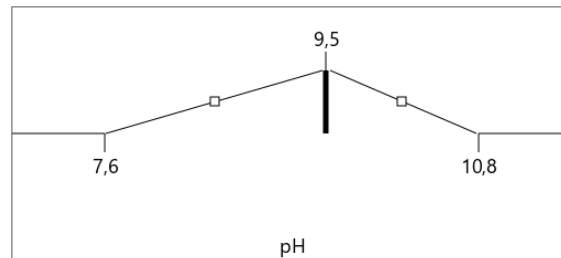
La ecuación anterior nos ayudara a predecir el valor del Costo en Bs de acuerdo a los cambios que necesitemos realizar en los valores A, B, C.

Optimización de los resultados

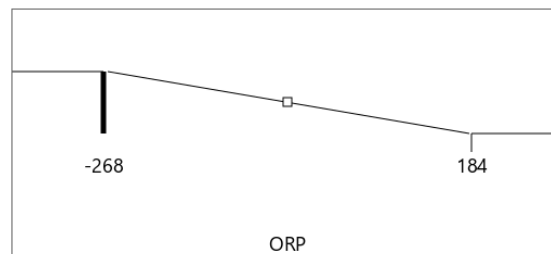
Para hallar un equilibrio óptimo entre costo, voltaje e intensidad utilizada en el proceso de obtención de agua alcalina se procede de la siguiente forma.

Se trabaja con los 3 valores de respuesta (pH, ORP, Costo).

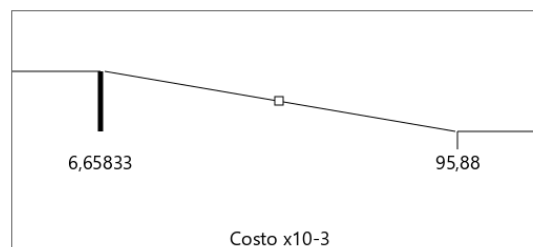
Para el pH elegimos como objetivo de la optimización un valor pH=9,5



Para el ORP elegimos como objetivo de la optimización la minimización de este factor.



Para el costo elegimos como objetivo de la optimización la minimización de este factor



A continuación, se muestran las condiciones seleccionadas:

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
A: Tiempo	is in range	20	30	1	1	3
B: Voltaje	is in range	5	24	1	1	3
C: Intensidad	is in range	0,5	1	1	1	3
pH	is target = 9,5	7,6	10,8	1	1	4
ORP	minimize	-268	184	1	1	3
Costo x10-3	minimize	6,65833	95,88	1	1	4

Se encontraron un total de 55 soluciones posibles

Number	Tiempo	Voltaje	Intensidad	pH	ORP	Costo x10-3	Desirability
1	20	24	0,729	9,5	-138,127	46,435	0,736
2	20,038	24	0,728	9,5	-138,205	46,486	0,735
3	20	23,998	0,727	9,493	-137,411	46,29	0,735
4	20	23,81	0,734	9,5	-136,937	46,437	0,735
5	20	24	0,726	9,491	-137,241	46,254	0,735
6	20,157	24	0,726	9,5	-138,461	46,649	0,735
7	20	24	0,725	9,486	-136,774	46,158	0,734
8	20,327	24	0,724	9,5	-138,83	46,878	0,734
9	20	23,46	0,744	9,5	-134,703	46,44	0,733
10	20,373	23,984	0,724	9,5	-138,835	46,941	0,733
11	20	23,935	0,734	9,512	-138,901	46,676	0,732
12	20,002	24	0,718	9,462	-134,402	45,676	0,732
13	20,638	24	0,72	9,5	-139,54	47,292	0,732
14	20,155	23,201	0,749	9,5	-133,289	46,659	0,731
15	20	23,999	0,714	9,447	-132,955	45,38	0,731
16	20,193	22,58	0,768	9,5	-129,168	46,723	0,728
17	20	22,264	0,781	9,5	-126,739	46,454	0,728
18	20	22,083	0,787	9,5	-125,477	46,457	0,728
19	20	21,914	0,792	9,5	-124,298	46,459	0,727
20	20	24	0,741	9,542	-142,297	47,286	0,725
21	20	24	0,683	9,342	-122,568	43,257	0,719
22	23,411	24	0,677	9,5	-147,566	50,532	0,718
23	20	20,196	0,857	9,5	-111,466	46,491	0,718
24	30	24	0,5	9,35	-174,5	49,521	0,718
25	30	24	0,509	9,376	-175,823	50,35	0,718
26	20	20,135	0,859	9,5	-110,982	46,493	0,718
27	29,949	24	0,5	9,347	-173,915	49,424	0,718
28	30	24	0,522	9,412	-177,654	51,498	0,717
29	30	23,898	0,508	9,362	-173,706	49,998	0,717
30	29,762	24	0,524	9,401	-175,266	51,18	0,717
31	24,264	24	0,663	9,5	-150,715	51,357	0,716
32	29,991	24	0,554	9,5	-182,095	54,318	0,715
33	29,307	24	0,529	9,387	-171,064	50,742	0,715
34	24,646	24	0,657	9,5	-152,241	51,699	0,714
35	29,661	24	0,561	9,5	-179,729	54,288	0,714
36	24,367	24	0,65	9,463	-148,169	50,545	0,714
37	29,999	23,864	0,558	9,498	-180,148	54,367	0,714
38	29,176	24	0,501	9,299	-165,147	48,012	0,713
39	28,97	24	0,55	9,425	-170,774	51,893	0,713
40	20	19,227	0,899	9,5	-103,494	46,517	0,713

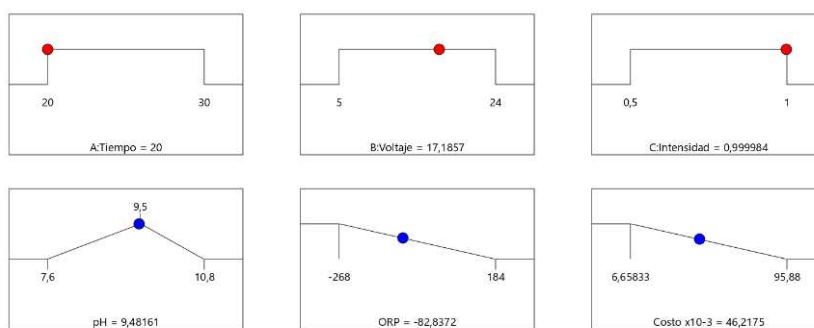
41	25,451	24	0,643	9,5	-155,689	52,356	0,713
42	28,631	24	0,572	9,469	-170,978	53,13	0,712
43	28,538	24	0,566	9,445	-168,992	52,411	0,712
44	25,667	24	0,637	9,494	-156,196	52,351	0,712
45	25,801	24	0,637	9,5	-157,294	52,616	0,712
46	28,409	24	0,575	9,466	-169,405	53,001	0,712
47	26,117	24	0,631	9,5	-158,8	52,837	0,711
48	26,342	24	0,627	9,5	-159,899	52,983	0,711
49	27,952	24	0,581	9,456	-165,926	52,563	0,711
50	26,71	24	0,62	9,5	-161,773	53,213	0,711
51	27,603	24	0,594	9,473	-164,864	52,898	0,711
52	27,012	24	0,613	9,496	-163,074	53,266	0,711
53	20	17,463	0,991	9,5	-87,16	46,578	0,701
54	20	17,404	0,995	9,5	-86,568	46,58	0,701
55	20	17,186	1	9,482	-82,837	46,218	0,697

De las cuales se eligieron 6 que llegan a cumplir con un valor de pH cercano al requerido además de un costo bajo

Solución	Tiempo, min	Voltaje, V	Intensidad, A	pH	ORP, mV	Costo $\times 10^{-3}$, Bs
19	20	21,91	0,7924	9,499	-124,298	46,4588
21	20	24	0,6833	9,342	-122,568	43,2573
23	20	20,19	0,857	9,499	-111,466	46,4914
40	20	19,23	0,899	9,5	-103,494	46,5171
53	20	17,46	0,991	9,5	-87,16	46,5776
55	20	17,18	0,999	9,48	-82,83	46,2175

De las 6 soluciones seleccionamos la 55, debido a que cumple de buena manera el requisito de pH escogido y de costo reducido, además que para ello utiliza un valor bajo de voltaje que es el efecto que más influye en el costo del proceso.

Esto se puede visualizar en las siguientes graficas:



Entonces para obtener un agua de pH=9,48 tenemos que:

FACTORES	VALOR	RESPUESTAS	VALOR
Tiempo, min	20	pH	9,48
Voltaje, V	17,19	ORP, mV	-82,84
Intensidad, A	1	Costo $\times 10^{-3}$, Bs	46,22

ANEXO H: RESULTADOS DE ANÁLISIS DEL AGUA ALCALINA IONIZADA PRODUCIDA EN EL LABORATORIO

Universidad Mayor de San Andrés
 Facultad de Ciencias Puras y Naturales
 Instituto de Ecología
 Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: A 51/22

Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYO EN AGUA A 51/22

Cliente:	UMSA - FACULTAD DE INGENIERÍA
Solicitante:	Cristian Fernando Limachi Arani
Dirección del cliente:	Senkata, Z/San Sebastian, Nro. 5554
Procedencia de la muestra:	IDE/PROQ
	Departamento: La Paz
Punto de muestreo:	Después de la electrólisis del agua de osmosis inversa
Responsable del muestreo:	Cristian Fernando Limachi Arani
Fecha de muestreo:	22 de junio de 2022
Hora de muestreo:	10:30
Fecha de recepción de la muestra:	22 de junio de 2022
Fecha de ejecución del ensayo:	Del 22 al 29 de junio, 2022
Caracterización de la muestra:	Producción de agua alcalina ionizada
Tipo de muestra:	Simple
Envase:	Botella pet
Código LCA:	51- 1
Código original :	Agua alcalina

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Limite de determinación	Agua alcalina 51- 1
Calcio	EPA 215.1	mg/l	0,32	5,8
Cloruros	SM-4500-Cl-B	mg Cl/l	0,020	3,3
Conductividad eléctrica	EPA 120.1	µS/cm	1,0	132
Dureza total	SM 2340 - B	mg CaCO ₃ /l	2,0	9,0
Magnesio	EPA 242.1	mg/l	0,18	2,9
pH	EPA 150.1		1 - 14	9,35
Potasio	EPA 258.1	mg/l	0,21	1,9
Sodio	EPA 273.1	mg/l	0,019	9,1
Sólidos totales	EPA 160.3	mg/l	10	68
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0,10	0,16

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
 EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)
 Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
 La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, 5 de Julio de 2022



Jaime Chincheros Peñaagua
 Ing. Jaime Chincheros Peñaagua
 Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



JCH/CA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
 Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

ANEXO I: RESULTADOS DE ANÁLISIS DEL AGUA ALCALINA IONIZADA COMERCIAL “XYZ”

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: A 54/22

Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYO EN AGUA A 54/22

Cliente:	EMPRESA AGUAS DEL HOREB -ION LIFE
Solicitante:	Cristian Fernando Limachi Aruni
Dirección del cliente:	Villa Armonia, C/1, Nro. 50
Procedencia de la muestra:	Villa Armonia
	Departamento: La Paz
Punto de muestreo:	Después del envasado del agua alcalina ionizada
Responsable del muestreo:	Cristian Fernando Limachi Aruni
Fecha de muestreo:	23 de junio de 2022
Hora de muestreo:	10:40
Fecha de recepción de la muestra:	23 de junio de 2022
Fecha de ejecución del ensayo:	Del 23 al 29 de junio, 2022
Caracterización de la muestra:	Agua alcalina ionizada
Tipo de muestra:	Simple
Envase:	Botella pet
Código LCA:	54- 1
Código original :	ION LIFE

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Limite de determinación	ION LIFE 54- 1
Calcio	EPA 215.1	mg/l	0,32	0,39
Cloruros	SM-4500-Cl--B	mg Cl/l	0,020	1,0
Coliformes totales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	< 2,0
Conductividad eléctrica	EPA 120.1	µS/cm	1,0	14
Dureza total	SM 2340 - B	mg CaCO ₃ /l	2,0	4,0
Magnesio	EPA 242.1	mg/l	0,18	0,73
pH	EPA 150.1		1 - 14	9,2
Potasio	EPA 258.1	mg/l	0,21	0,37
Sodio	EPA 273.1	mg/l	0,019	1,1
Solidos totales	EPA 160.3	mg/l	10	< 10
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0,10	0,16

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)
Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, 6 de Julio de 2022


Ing. Jaime Chincheros Paniagua
Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



JCH/LCA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

ANEXO J: RESULTADOS DE ANÁLISIS DEL AGUA ACIDA PRODUCIDA EN EL LABORATORIO

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: A 52/22

Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYO EN AGUA A 52/22

Cliente:	UMSA - FACULTAD DE INGENIERÍA
Solicitante:	Cristian Fernando Limachi Aruni
Dirección del cliente:	Senkata, Z/San Sebastian, Nro. 5554
Procedencia de la muestra:	IIDEPROQ Departamento: La Paz
Punto de muestreo:	Después de la electrofisis del agua de osmosis inversa
Responsable del muestreo:	Cristian Fernando Limachi Aruni
Fecha de muestreo:	22 de junio de 2022
Hora de muestreo:	10:40
Fecha de recepción de la muestra:	22 de junio de 2022
Fecha de ejecución del ensayo:	Del 22 al 29 de junio, 2022
Caracterización de la muestra:	Producción de agua ácida
Tipo de muestra:	Simple
Envase:	Botella pet
Código LCA:	52- 1
Código original:	Agua Ácida

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	Agua Ácida 52- 1
Calcio	EPA 215.1	mg/l	0,32	1,7
Cloruros	SM-4500-Cl-B	mg Cl/l	0,020	7,5
Conductividad eléctrica	EPA 120.1	µS/cm	1,0	52
Dureza total	SM 2340 - B	mg CaCO ₃ /l	2,0	7,5
Magnesio	EPA 242.1	mg/l	0,18	0,86
pH	EPA 150.1		1 - 14	5,8
Potasio	EPA 258.1	mg/l	0,21	0,5
Sodio	EPA 273.1	mg/l	0,019	1,9
Sólidos totales	EPA 160.3	mg/l	10	34
Turbidez	EPA 180.1	UTN	0,10	< 0,10

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)
Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, 5 de Julio de 2022


Ing. Jaime Chincheros Paragagua
Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



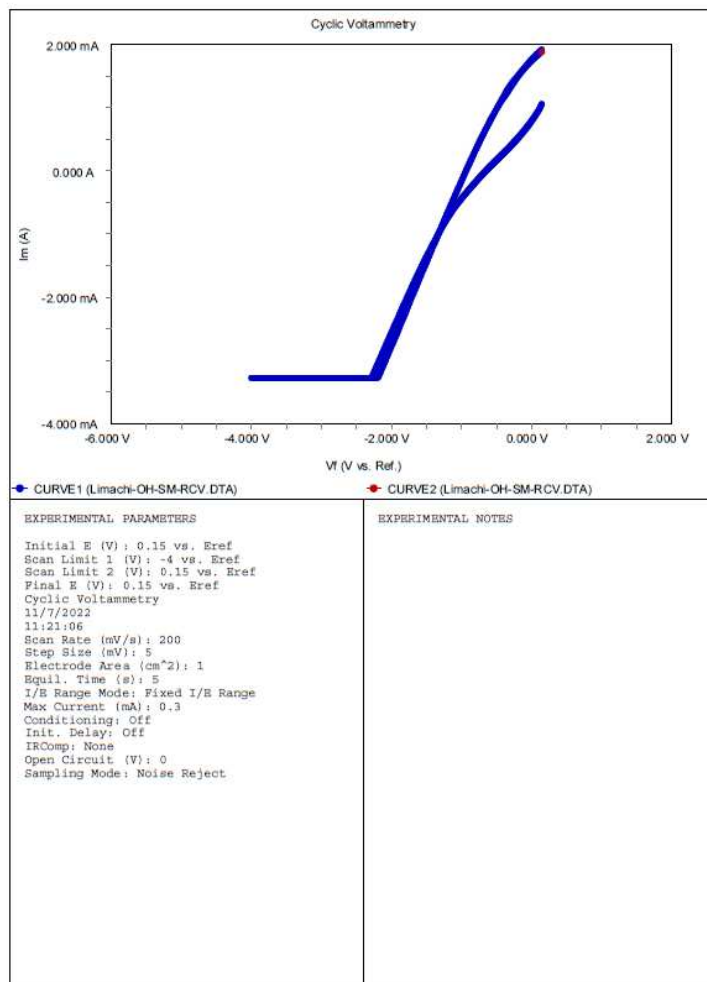
EHS/CA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

ANEXO K

- Barridos de Potencial vs Corriente de la voltametría cíclica

Para la construcción de la gráfica de voltametría cíclica se produjeron 1661 datos de barrido de potencial-corriente, con los cuales analizando la gráfica y los datos se calculan parámetros electroquímicos.

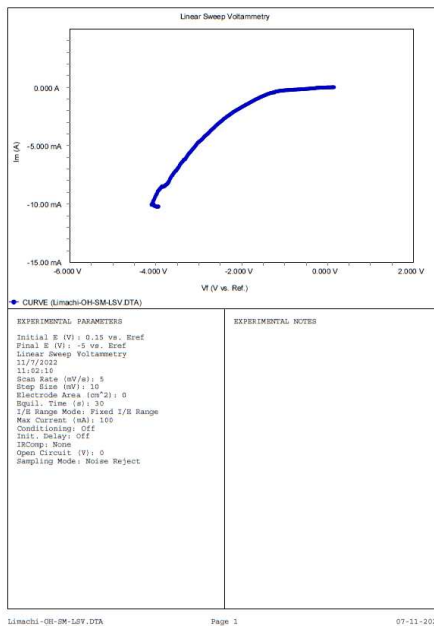


ANEXO K

- Barridos de Potencial Vs Corriente para el estudio de la cinética electroquímica con la Voltametría de Barrido Lineal

Para la rama catódica:

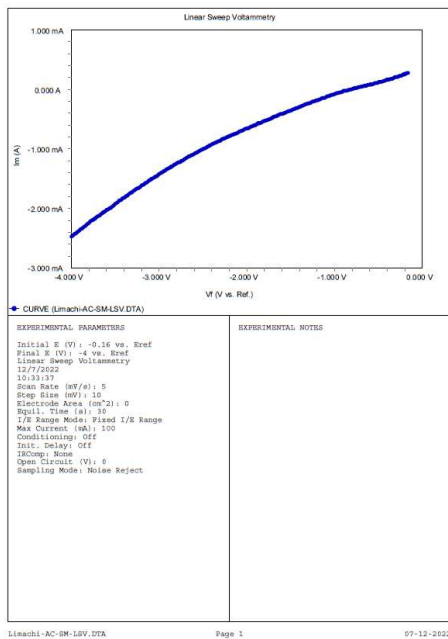
Para la construcción de la gráfica lineal se produjeron 458 datos de corriente, con los cuales datos se calculan parámetros



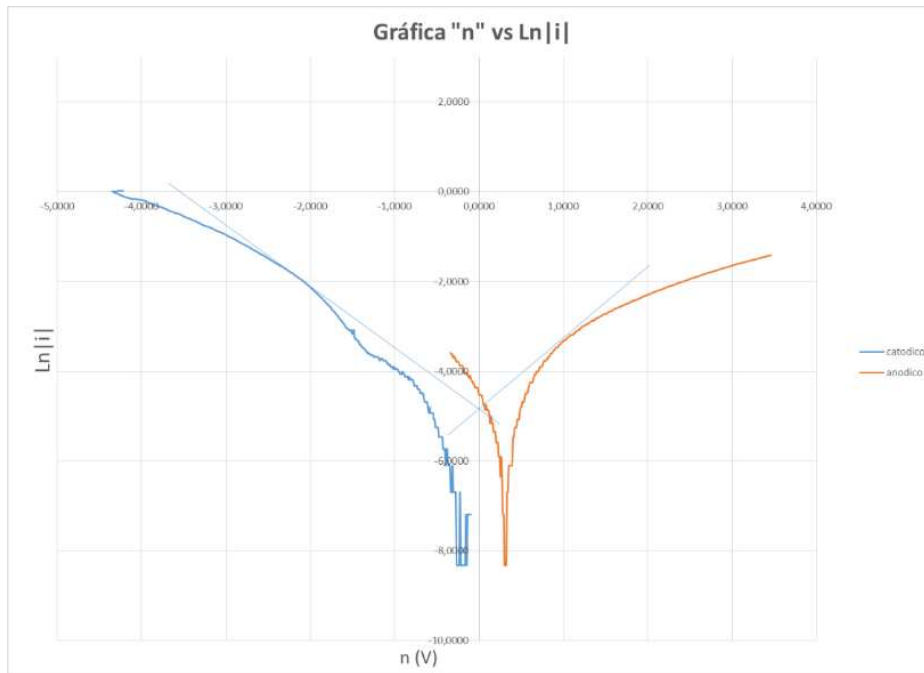
de voltametría de barrido potencial-analizando la gráfica y los cinéticos.

Para la rama anódica:

Para la construcción de la gráfica de voltametría de barrido lineal se produjeron 335 datos de barrido de potencial-corriente, con los cuales analizando la gráfica y los datos se calculan los parámetros cinéticos.



ANEXO L: CÁLCULOS AUXILIARES PARA LA ECUACIÓN DE TAFEL



catodico n	regresion ln(i)	anodico n	regresion ln(i)			
-1,939702	-2,06953874	0,619902	-3,60292931			
-1,949702	-2,04605319	0,629802	-3,56688131			
-1,959802	-2,03834566	0,639802	-3,53208769			
-1,969702	-2,02310658	0,649902	-3,53208769			
-1,979802	-2,0067472	0,659802	-3,49846407			
-1,989602	-1,99330788	0,669902	-3,46593432			
-1,999702	-1,97152749	0,679902	-3,46593432			
-2,009702	-1,95726639	0,689902	-3,46593432			
-2,019702	-1,94320581					
-2,029602	-1,93624897					
-2,039802	-1,92247882					
-2,049702	-1,90889571					
-2,059702	-1,89549464					
-2,069702	-1,87572386					
-2,079702	-1,86921951			m	2,01657688	-1,33333991
-2,089802	-1,85633639			b	-4,83686624	-4,64337735
-2,099702	-1,83731766			r	0,96191244	-0,99891854
-2,109702	-1,82483653					
-2,119702	-1,81250926					
-2,129702	-1,80033211					
-2,139702	-1,79429869					
-2,149702	-1,77641382					
-2,159702	-1,76466584					
-2,169702	-1,75305427					
-2,179702	-1,74157599					
-2,189702	-1,73022796					
-2,199602	-1,71344379					
-2,209702	-1,70240883					

ANEXO M: RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE CATIONES DEL AGUA ALCALINA IONIZADA DURANTE INTERVALOS DE TIEMPO

- Muestra en el tiempo $t = 2$ min durante el proceso de producción del agua alcalina

Universidad Mayor de San Andrés
 Facultad de Ciencias Puras y Naturales
 Instituto de Ecología
 Laboratorio de Calidad Ambiental


 Página 1 de 1

Informe de Ensayo: A 55-1

INFORME DE ENSAYO EN AGUA A 55/22


Urbio:	UMSA - FACULTAD DE INGENIERIA
Solicitante:	Cristian Fernando Jimachi Arana
Dirección del cliente:	Sede de la Facultad de Ingeniería, P.O. 5554
Procedencia de la muestra:	IBH PISO 9
Punto de muestreo:	Departamento: La Paz
Responsable del muestreo:	Dr. Jaime Chunchuro Pomaagua
Fecha de muestreo:	Cristian Fernando Jimachi Arana
Hora de muestreo:	22 de junio de 2022
Fecha de recepción de la muestra:	10:30
Fecha de ejecución del ensayo:	22 de junio de 2022
Caracterización de la muestra:	Del 22 al 29 de junio, 2022
Tipo de muestra:	Producción de agua alcalina ionizada
Envase:	Sample
Código I.C.A.:	Botella pet
Código original:	55-1
	Agua alcalina

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	Agua alcalina 55-1
Calcio	EPA 215.1	mg/l	0.32	4.1
Potasio	EPA 258.1	mg/l	0.21	1.52
Sodio	EPA 273.1	mg/l	0.019	7.8
Magnesio	EPA 242.1	mg/l	0.18	2.67

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
 EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)
 Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del I.C.A.
 La difusión de los resultados debe ser en su integridad.
 La Paz, 5 de Julio de 2022



 Ing. Jaime Chunchuro Pomaagua
 Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
 Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

- Muestra en el tiempo $t = 4$ min durante el proceso de producción del agua alcalina

Universidad Mayor de San Andrés
 Facultad de Ciencias Puras y Naturales
 Instituto de Ecología
 Laboratorio de Calidad Ambiental


 Página 1 de 1

Informe de Ensayo: A 56-1


FORME DE ENSAYO EN AGUA A 56/22

Urbio:	UMSA - FACULTAD DE INGENIERIA
Solicitante:	Cristian Fernando Jimachi Arana
Dirección del cliente:	Sede de la Facultad de Ingeniería, P.O. 5554
Procedencia de la muestra:	IBH PISO 9
Punto de muestreo:	Departamento: La Paz
Responsable del muestreo:	Dr. Jaime Chunchuro Pomaagua
Fecha de muestreo:	Cristian Fernando Jimachi Arana
Hora de muestreo:	22 de junio de 2022
Fecha de recepción de la muestra:	10:30
Fecha de ejecución del ensayo:	22 de junio de 2022
Caracterización de la muestra:	Del 22 al 29 de junio, 2022
Tipo de muestra:	Producción de agua alcalina ionizada
Envase:	Sample
Código I.C.A.:	Botella pet
Código original:	56-1
	Agua alcalina

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	Agua alcalina 56-1
Calcio	EPA 215.1	mg/l	0.32	4.3
Potasio	EPA 258.1	mg/l	0.21	1.84
Sodio	EPA 273.1	mg/l	0.019	7.3
Magnesio	EPA 242.1	mg/l	0.18	2.14

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
 EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)
 Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del I.C.A.
 La difusión de los resultados debe ser en su integridad.
 La Paz, 5 de Julio de 2022


 Ing. Jaime Chunchuro Pomaagua
 Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
 Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

- Muestra en el tiempo t = 6 min durante el proceso de producción del agua alcalina

Universidad Mayor de San Andrés
 Facultad de Ciencias Puras y Naturales
 Instituto de Ecología
 Laboratorio de Calidad Ambiental


 Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYO EN AGUA A 57/22

Cliente: Solicitante: Dirección del cliente: Precedencia de la muestra: Punto de muestreo: Responsable del muestreo: Fecha de muestreo: Hora de muestreo: Fecha de recepción de la muestra: Fecha de ejecución del ensayo: Caracterización de la muestra: Tipo de muestra: Envase: Código LCA: Código original:	UMSA - FACULTAD DE INGENIERÍA Cristian Fernando Jimachi Araní Suñatari, Z/San Sebastián, Nro. 5554 1008 PIPRO Departamento: La Paz Después de la electrólisis del agua de osmosis inversa Cristian Fernando Jimachi Araní 27 de junio de 2022 10:30 Del 22 al 29 de junio, 2022 Producción de agua alcalina ionizada Sample Botella pet 57-1 Agua alcalina
---	--

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	Agua alcalina 57-1
Calcio	EPA 215.1	mg/l	0.32	4,6
Fósforo	EPA 258.1	mg/l	0.21	1,65
Sodio	EPA 273.1	mg/l	0.019	7,6
Magnesio	EPA 242.1	mg/l	0.18	2,37

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
 EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)
 Los resultados de este informe, no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
 La difusión de los resultados debe ser en su integridad.
 La Paz, 5 de Julio de 2022


 Ing. Jaime Chinceros Páez
 Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental


 INSTITUTO DE ECOLOGÍA
 LABORATORIO DE CALIDAD AMBIENTAL
 FCPS - U.S.A.
 La Paz - Bolivia

Campus Universitario- Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
 Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

- Muestra en el tiempo t = 8 min durante el proceso de producción del agua alcalina

Universidad Mayor de San Andrés
 Facultad de Ciencias Puras y Naturales
 Instituto de Ecología
 Laboratorio de Calidad Ambiental


 Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYO EN AGUA A 58/22

Cliente: Solicitante: Dirección del cliente: Precedencia de la muestra: Punto de muestreo: Responsable del muestreo: Fecha de muestreo: Hora de muestreo: Fecha de recepción de la muestra: Fecha de ejecución del ensayo: Caracterización de la muestra: Tipo de muestra: Envase: Código LCA: Código original:	UMSA - FACULTAD DE INGENIERÍA Cristian Fernando Jimachi Araní Suñatari, Z/San Sebastián, Nro. 5554 1008 PIPRO Departamento: La Paz Después de la electrólisis del agua de osmosis inversa Cristian Fernando Jimachi Araní 27 de junio de 2022 10:30 Del 22 al 29 de junio, 2022 Producción de agua alcalina ionizada Sample Botella pet 58-1 Agua alcalina
---	--

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	Agua alcalina 58-1
Calcio	EPA 215.1	mg/l	0.32	4,7
Fósforo	EPA 258.1	mg/l	0.21	1,65
Sodio	EPA 273.1	mg/l	0.019	7,6
Magnesio	EPA 242.1	mg/l	0.18	2,37

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
 EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)
 Los resultados de este informe, no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
 La difusión de los resultados debe ser en su integridad.
 La Paz, 5 de Julio de 2022


 Ing. Jaime Chinceros Páez
 Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental


 INSTITUTO DE ECOLOGÍA
 LABORATORIO DE CALIDAD AMBIENTAL
 FCPS - U.S.A.
 La Paz - Bolivia

Campus Universitario- Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
 Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

- Muestra en el tiempo $t = 10$ min durante el proceso de producción del agua alcalina

Universidad Mayor de San Andrés
 Facultad de Ciencias Puras y Naturales
 Instituto de Ecología
 Laboratorio de Calidad Ambiental


 Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYO EN AGUA A 59/22

Cliente: Solución: Dirección del cliente: Provedora de la muestra: Punto de muestreo: Responsable del muestreo: Fecha de muestreo: Hora de muestreo: Fecha de recepción de la muestra: Fecha de ejecución del ensayo: Caracterización de la muestra: Tipo de muestra: Envase: Código LCA: Código original:	UMSA - FACULTAD DE INGENIERÍA Cristian Fernando Imachi Araní Suñakota, Z/San Sebastián, Box. 5554 BBDFPBOJ Departamento: La Paz Después de la electrólisis del agua de osmosis inversa Cristian Fernando Imachi Araní 27 de junio de 2022 10:30 27 de junio de 2022 Del 22 al 29 de junio, 2022 Producción de agua alcalina ionizada Simple Botella net 59-1 agua alcalina
--	---

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	Agua alcalina (d. 1)
Calcio	EPA 215.1	mg/l	0.32	4,9
Potasio	EPA 238.1	mg/l	0.21	1,69
Sodio	EPA 273.1	mg/l	0.019	7,8
Magnesio	EPA 242.1	mg/l	0.18	2,43

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
 EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)
 Los resultados de este informe, no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
 La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, 5 de Julio de 2022


 Ing. Jaime Chincheros Pineda
 Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



Campus Universitario: Calle 27 de Coña Coña, La Paz, Telf./Fax: 2772522
 Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

- Muestra en el tiempo $t = 12$ min durante el proceso de producción del agua alcalina

Universidad Mayor de San Andrés
 Facultad de Ciencias Puras y Naturales
 Instituto de Ecología
 Laboratorio de Calidad Ambiental


 Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYO EN AGUA A 60/22

Cliente: Solución: Dirección del cliente: Provedora de la muestra: Punto de muestreo: Responsable del muestreo: Fecha de muestreo: Hora de muestreo: Fecha de recepción de la muestra: Fecha de ejecución del ensayo: Caracterización de la muestra: Tipo de muestra: Envase: Código LCA: Código original:	UMSA - FACULTAD DE INGENIERÍA Cristian Fernando Imachi Araní Suñakota, Z/San Sebastián, Box. 5554 BBDFPBOJ Departamento: La Paz Después de la electrólisis del agua de osmosis inversa Cristian Fernando Imachi Araní 27 de junio de 2022 10:30 27 de junio de 2022 Del 22 al 29 de junio, 2022 Producción de agua alcalina ionizada Simple Botella net 60-1 agua alcalina
--	---

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	Agua alcalina (d. 1)
Calcio	EPA 215.1	mg/l	0.32	5,1
Potasio	EPA 238.1	mg/l	0.21	1,75
Sodio	EPA 273.1	mg/l	0.019	8,2
Magnesio	EPA 242.1	mg/l	0.18	2,56

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
 EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)
 Los resultados de este informe, no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
 La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, 5 de Julio de 2022


 Ing. Jaime Chincheros Pineda
 Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



Campus Universitario: Calle 27 de Coña Coña, La Paz, Telf./Fax: 2772522
 Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

- Muestra en el tiempo t = 14 min durante el proceso de producción del agua alcalina

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental

Informe de Ensayo: A 61/22

INFORME DE ENSAYO EN AGUA A 61/22

Cliente: UMSA - FACULTAD DE INGENIERIA
 Solicitante: Cristian Fernando Linares Araní
 Dirección del cliente: Suñata, 7/San Sebastián, Nro. 5554
 Procedencia de la muestra: HIBPROJ
 Departamento: La Paz
 Punto de muestreo: Después de la electrólisis del agua de osmosis inversa
 Responsable del muestreo: Cristian Fernando Linares Araní
 Fecha de muestreo: 27 de junio de 2022
 Hora de muestreo: 10:38
 Fecha de recepción de la muestra: 27 de junio de 2022
 Fecha de ejecución del ensayo: Del 27 al 29 de junio, 2022
 Caracterización de la muestra: Producción de agua alcalina ionizada
 Tipo de muestra: Simple
 Lugar: Buzón 003
 Emisor: 01-1
 Código LCA: 01-1
 Código original: Agua alcalina

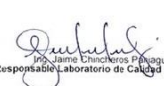
Página 1 de 1

Resultado de Análisis


Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	Agua alcalina 01-1
Calcio	EPA 215.1	mg/l	0.32	5,5
Potasio	EPA 258.1	mg/l	0.21	1,78
Sodio	EPA 273.1	mg/l	0.019	8,5
Magnesio	EPA 242.1	mg/l	0.18	2,64

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
 EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)
 Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
 La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, 5 de Julio de 2022



Ing. Jaime Chincorinos Pineda
Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf/Fax: 2772522
 Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

- Muestra en el tiempo t = 16 min durante el proceso de producción del agua alcalina

- Muestra en el tiempo t = 20 min durante el proceso de producción del agua alcalina

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental

Informe de Ensayo: A 62/22

INFORME DE ENSAYO EN AGUA A 62/22

Cliente: UMSA - FACULTAD DE INGENIERIA
 Solicitante: Cristian Fernando Linares Araní
 Dirección del cliente: Suñata, 7/San Sebastián, Nro. 5554
 Procedencia de la muestra: HIBPROJ
 Departamento: La Paz
 Punto de muestreo: Después de la electrólisis del agua de osmosis inversa
 Responsable del muestreo: Cristian Fernando Linares Araní
 Fecha de muestreo: 27 de junio de 2022
 Hora de muestreo: 10:30
 Fecha de recepción de la muestra: 27 de junio de 2022
 Fecha de ejecución del ensayo: Del 27 al 29 de junio, 2022
 Caracterización de la muestra: Producción de agua alcalina ionizada
 Tipo de muestra: Simple
 Lugar: Buzón 003
 Emisor: 01-1
 Código LCA: 01-1
 Código original: Agua alcalina

Página 1 de 1

Resultado de Análisis


Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	Agua alcalina 01-1
Calcio	EPA 215.1	mg/l	0.32	5,5
Potasio	EPA 258.1	mg/l	0.21	1,83
Sodio	EPA 273.1	mg/l	0.019	8,7
Magnesio	EPA 242.1	mg/l	0.18	2,75

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
 EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)
 Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
 La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, 5 de Julio de 2022



Ing. Jaime Chincorinos Pineda
Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf/Fax: 2772522
 Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental

Informe de Ensayo: A 63/22

INFORME DE ENSAYO EN AGUA A 63/22

Cliente: UMSA - FACULTAD DE INGENIERIA
 Solicitante: Cristian Fernando Linares Araní
 Dirección del cliente: Suñata, 7/San Sebastián, Nro. 5554
 Procedencia de la muestra: HIBPROJ
 Departamento: La Paz
 Punto de muestreo: Después de la electrólisis del agua de osmosis inversa
 Responsable del muestreo: Cristian Fernando Linares Araní
 Fecha de muestreo: 27 de junio de 2022
 Hora de muestreo: 10:30
 Fecha de recepción de la muestra: 27 de junio de 2022
 Fecha de ejecución del ensayo: Del 27 al 29 de junio, 2022
 Caracterización de la muestra: Producción de agua alcalina ionizada
 Tipo de muestra: Simple
 Lugar: Buzón 003
 Emisor: 01-1
 Código LCA: 01-1
 Código original: Agua alcalina

Página 1 de 1

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	Agua alcalina 01-1
Calcio	EPA 215.1	mg/l	0.32	5,8
Potasio	EPA 258.1	mg/l	0.21	1,9
Sodio	EPA 273.1	mg/l	0.019	9,1
Magnesio	EPA 242.1	mg/l	0.18	3,14

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
 EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)
 Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
 La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, 5 de Julio de 2022

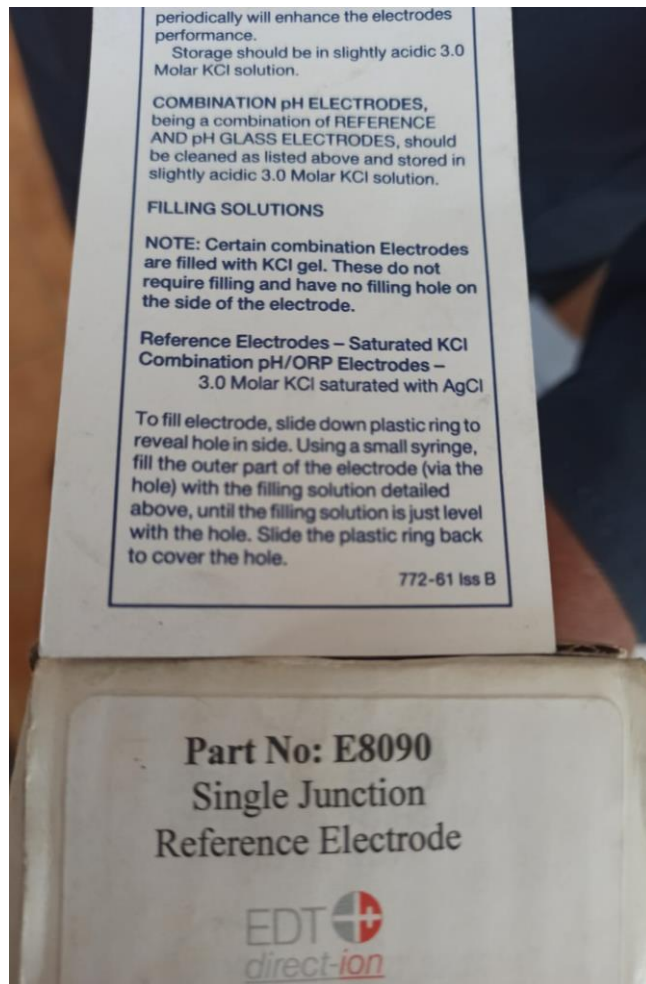


Ing. Jaime Chincorinos Pineda
Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf/Fax: 2772522
 Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia

ANEXO N: ELECTRODO DE REFERENCIA “ELECTRODO SATURADO DE CALOMEL”



ANEXO O: POTENCIOSTATO SERIES G 300 – GALVANOSTATO SERIES G 750



Redefining Electrochemical Measurement

Series G 300™ and Series G 750™ Potentiostat/Galvanostat/ZRA Quick-Start Guide

Installation Sequence is Important for Success

The Gamry potentiostats are plug-and-play devices. **Therefore, setup is easiest if you use the sequence below, installing the software before the hardware.** Setup of the Series G Potentiostat takes about 15 minutes.

- 1) **Install the Gamry Framework™ software on the PC.** In the process, you will also install the Gamry software packages you have purchased, such as DC105 DC Corrosion Techniques and EIS300 Electrochemical Impedance Spectroscopy Software. See page 5.
- 2) **Install the Series G 300™ or Series G 750™ Potentiostat in the PC.** The operating system and Gamry software will recognize the Potentiostat automatically when you restart the PC. See page 6.
- 3) **Complete software setup.** You will be prompted through this task when you restart the PC after installing the software and hardware. See page 8.
- 4) **Calibrate the potentiostat** using the Universal Dummy Cell 4 included in your Gamry shipment. See page 9.
- 5) **Do optional tests** using the Universal Dummy Cell 4. See page 13.

When the first four tasks have been completed, the Series G potentiostat is ready to use.

You can run experiments and gather data with your Gamry software packages. **Instructions for running experiments** are on page 16.

This guide also includes **instructions for installing Gamry Echem Analyst™**. (See page 14.) Gamry Echem Analyst makes it easy for you to view and manipulate experiment data.

Table of Contents

Installation Sequence is Important for Success	1
Table of Contents.....	1
Cautions.....	1
Computer Requirements.....	2
Compatibility Between Software Versions and Potentiostats	2
Authorization Codes and Serial Numbers.....	2
Preparations	3
Installation of Gamry Framework and Software Packages	5
Installing Potentiostat and Controller Boards.....	6
Completing Software Setup	8
Calibration.....	9
Gamry Echem Analyst Installation.....	14
Sources of More Information.....	15
Contacting Gamry.....	15
Reference Information	16
Procedure for Experiments.....	16
Grounding.....	16
Gamry File Types	16
General Instructions for Connecting Leads	16

Cautions

➔ To avoid damaging electronic components on the Gamry Potentiostat and controller boards, and in your PC, observe standard precautions against static damage.

Ground yourself before touching the potentiostat boards or components inside your PC.

Handle printed circuit boards only by their edges. (Fingerprints on the boards can be harmful.)

ANEXO P: ANALISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS "X" AL ELECTRODO DE TITANIO

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES GEOLÓGICAS Y DEL MEDIO AMBIENTE
SERVICIOS LABORATORIOS
La Paz - Bolivia

**INFORME LABORATORIO DE RAYOS X
DRX - FRX**

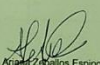
Solicitante: Cristian Limachi
 Tipo de Análisis: DRX
 Número de muestras: una
 Tipo de muestra: Muestra de artefacto metálico
 Operador: Ariana Zeballos Espinoza
 Fecha: La Paz, mayo de 2023
 Orden: 26


oooooooooooo

DESCRIPCION MACROSCOPICA DE LA MUESTRA.
 La muestra ha sido identificada con el nombre de "M-1 Metal" perteneciente a una muestra de un artefacto metálico de color plateado.

PREPARACION DE LA MUESTRA.
 Se tomó una parte de la muestra, misma que fue pulverizadas en mortero de ágata.

CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL EQUIPO DE DRX
 El análisis mineralógico de fases sólidas cristalinas se realizó en un equipo de Difracción (DRX) PanAnalytical Expert Plus con tubo generador de Rayos X de Cu (cobre) y filtro de Ni, dando radiación K Alfa del Cu con longitud de onda de 1.54178 Å, bajo las condiciones de operación: Radiación a 40 Kv. y 40mA, rango de registro de 3º a 60º, detección con XCELERATOR de 125 canales y escala de detección automática.

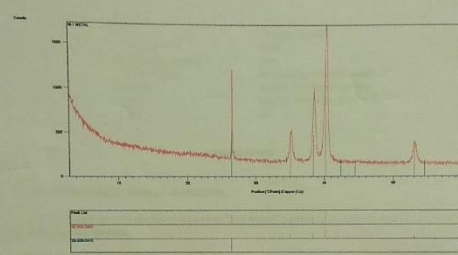

 Ing. Ariana Zeballos Espinoza PhD
 DOCENTE INVESTIGADOR - IGEMA



Telf: 2793392 • Fax: 2793124 • E-mail: igemaumsa@gmail.com • Casilla 35140 • Calle 27, Pabellón 3, Campus Universitario, Cota Cota • La Paz - Bolivia

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES GEOLÓGICAS Y DEL MEDIO AMBIENTE
SERVICIOS LABORATORIOS
La Paz - Bolivia

**MUESTRA "M-1 Metal"
(DIFRACCIÓN DE RAYOS X)**




IDENTIFICACIÓN DE FASES CRISTALINAS

A. COMPONENTES MAYORITARIOS:

1	Titanio	Ti
---	---------	----

B. COMPONENTES MINORITARIOS:

1	Grafito	C
---	---------	---



Telf: 2793392 • Fax: 2793124 • E-mail: igemaumsa@gmail.com • Casilla 35140 • Calle 27, Pabellón 3, Campus Universitario, Cota Cota • La Paz - Bolivia

AUTOR

Cristian Fernando Limachi Aruni

Correo: limachiarunic@gmail.com

Celular: 70197570

RESOLUCIÓN SENAPI



ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA

MINISTERIO DE DESARROLLO PRODUCTIVO Y ECONOMÍA PLURAL



2023-TTES-228-D-1

DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-800/2023 La Paz, 29 de Agosto del 2023

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **22 de agosto del 2023**, por **CRISTIAN FERNANDO LIMACHI ARUNI** con C.J. N° 9971551 LP, con número de trámite **DA 1279/2023**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: **"Obtención de agua alcalina ionizada a partir de agua de osmosis inversa, mediante el proceso de la electrolisis"**, cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el *"Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración"*.

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece *"Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión"*. En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: *"la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios"*.



- Oficina Central - La Paz**
Av. Mariscal, N° 311,
entre las Calles 10 y 11
C. San Martín
Tel.: 22020000 - 22020001
www.senapi.gob.bo
- Oficina - Santa Cruz**
Av. Engaño, Calle
Independencia 1000,
N° 75, 500. Bloque 1000
Tel.: 3447500 - 3447501
- Oficina - Cochabamba**
Calle Bolivia, N° 232,
entre la de Italia y Alemania.
Tel.: 3494400 - 3494401
- Oficina - El Alto**
Av. Juan Pablo II, N° 240
Calle Placencia 11 Sur
Calle Pina, N. 18,
entre la de Italia.
Tel.: 3494400 - 3494401
- Oficina - Oruro**
Calle Edmundo, N° 300
Calle 100, 30000000,
Calle Piquiza Bolívar,
Tel.: 3494401
- Oficina - Sucre**
Av. La Paz, entre
Calle San Trigo y Anaco
Calle Santa Cruz, N° 20,
Tel.: 3494400
- Oficina - Tarija**
Calle 4 de Octubre,
N° 500, entre Apóstolo
y Juan, Calle 1000,
N. 10, 30000000,
Tel.: 3494400
- Oficina - Potosí**
Av. Millaño entre calles
Manuel de Siles y San Alberto,
Calle 100, Calle N° 20,
Potosí Pta. N. 1.



ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA

MINISTERIO DE DESARROLLO PRODUCTIVO Y ECONOMÍA PLURAL

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley Nº 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: "...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial".

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: "... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

POR TANTO

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas

RESUELVE:

INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos- el Proyecto de Grado titulado: "**Obtención de agua alcalina ionizada a partir de agua de osmosis inversa, mediante el proceso de la electrolisis**", a favor del autor y titular: **CRISTIAN FERNANDO LIMACHI ARUNI** con **C.I. Nº 9971551 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.



[Handwritten Signature]
Abg. Carlos Alberto Soruco Arroyo
**DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS**
SERVICIO NACIONAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL



CASA/ams
s.c.a.s.

Wilma - Cochabamba - La Paz
Av. Héroles, Nº 25,
entre las Bragatas y
L. Aguillón Alvarado.
Telf.: 292906 - 292976
www.senapi.gov.bo

Wilma - Santa Cruz
Av. Uruguay 146
prolongación Diagonal,
Nº 11, 180, Sucremasa.
Telf.: 329952 - 3294708

Wilma - Cochabamba
Calle Bolivia, Nº 71,
entre el cr. Julio y Antezana.
Telf.: 444444 - 3347907

Wilma - La Paz
Av. Juan Pablo II, Nº 204
Caf. Huancabamba II Orden
Telf.: 794 2 00 18,
zona de la India.
Telf.: 744041 - 7743319

Wilma - Oruro
Calle Huancabamba 1, Nº 348
100 mts. Huancabamba,
zona Parque Bolívar.
Telf.: 2009421

Wilma - Sucre
Av. la Paz, entre
Calle Los Villos y Avenida
180. Sucre Plaza, Nº 142.
Telf.: 2200000

Wilma - Sucre
Calle 8 de Octubre,
Nº 180, entre Aguache
y Jumbá, Sucre Central,
Calle 8 de Agosto 142,
Telf.: 2200000

Wilma - Potosí
Av. Miranda entre calles
Potosí Alto y San Martín,
100. AM. Talleres Nº 14,
Potosí Plaza, W. 11.