

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“SÍNTESIS DE HIPOCLORITO DE SODIO MEDIANTE  
UNA CELDA ELECTROLÍTICA”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

**AUTORES:**

YELTSINA JOYCI ALANIA MEDRANO

LIZBETH JULIANA CASTAÑEDA PALOMINO

**ASESOR:**

DR. JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Callao, 2024

PERÚ



## Document Information

<b>Analyzed document</b>	TESIS- CASTAÑEDA PALOMINO - ALANIA MEDRANO.pdf (D182328298)
<b>Submitted</b>	2023-12-19 21:39:00 UTC+01:00
<b>Submitted by</b>	
<b>Submitter email</b>	fiq.investigacion@unac.edu.pe
<b>Similarity</b>	7%
<b>Analysis address</b>	fiq.investigacion.unac@analysis.orkund.com

## Sources included in the report

<b>W</b>	URL: <a href="https://fgsalazar.net/LANDIVAR/ING-PRIMERO/boletin08/URL_08_ING02.pdf">https://fgsalazar.net/LANDIVAR/ING-PRIMERO/boletin08/URL_08_ING02.pdf</a> Fetched: 12/19/2023 9:40:00 PM	 <b>1</b>
<b>SA</b>	<b>1039-ESPINOZA ORIHUELA, MAXIMO FERNANDO.pdf</b> Document 1039-ESPINOZA ORIHUELA, MAXIMO FERNANDO.pdf (D33814430)	 <b>21</b>
<b>SA</b>	<b>TRABAJO DE TIITULACION PARA URKUND Sanchez- Davalos.pdf</b> Document TRABAJO DE TIITULACION PARA URKUND Sanchez- Davalos.pdf (D112521522)	 <b>1</b>
<b>SA</b>	<b>Doc. Proyecto de grado Mendoza Daniela.docx</b> Document Doc. Proyecto de grado Mendoza Daniela.docx (D168227033)	 <b>1</b>

## Entire Document

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA TESIS: "SÍNTESIS DE HIPOCLORITO DE SODIO MEDIANTE UNA CELDA ELECTROLÍTICA" PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO PRESENTADO POR: YELTSINA JOYCI ALANIA MEDRANO LIZBETH JULIANA CASTAÑEDA PALOMINO ASESOR: DR. JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA Callao, 2023 PERÚ

REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN La presente Tesis es Sustentada por la señorita Bachiller ALANIA MEDRANO YELTSINA JOYCI y la señorita Bachiller CASTAÑEDA PALOMINO LIZBETH JULIANA ante el JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS conformado por los siguientes Profesores Ordinarios: Ing. Mg. PABLO BELIZARIO DIAZ BRAVO PRESIDENTE Ing. Mg. POLICARPIO AGATON SUERO IQUIAPAZA SECRETARIO Ing. Dr. CESAR CUBA GUTIERREZ VOCAL Ing. Mg. JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA ASESOR

DEDICATORIA El presente trabajo lo dedico a Dios por darme salud, sabiduría y bendición para poder lograr concluir mi carrera. A mi madre Fidelina por ser mi fuerza, mi pilar, mi inspiración y mi motivación en todo lo que soy y en todo lo que hago, por su amor, sus palabras de aliento y su apoyo incondicional. A mis abuelos Marcela y Flavio por sus consejos para hacer de mí una mejor persona, a mi tío Elmer por enseñarme el valor de la perseverancia y a todas las personas que de una u otra manera han contribuido para el logro de mis objetivos. Yeltsina Joyci Alania Medrano

DEDICATORIA El presente trabajo lo dedico a mis padres Rubén y Catalina y a mi hermana Dayanne, quienes en todo momento estuvieron conmigo brindándome su amor y apoyo, además de hacer todo el esfuerzo durante todos estos años para que lograra llegar hasta aquí y poder culminar una etapa más en mi vida. Finalmente lo dedico también a todas aquellas personas entre familiares y amigos, que estuvieron presentes durante todo este proceso mostrándome su apoyo moral. Lizbeth Juliana Castañeda Palomino

## **INFORMACIÓN BÁSICA**

**FACULTAD:** Ingeniería Química

**UNIDAD DE INVESTIGACIÓN:** De la Facultad Ingeniería Química

**TÍTULO:** “Síntesis de hipoclorito de sodio mediante una celda electrolítica”

**AUTORES:**

Yeltsina Joyci Alania Medrano / Código ORCID: 0009-0008-5322-475X / DNI: 70114835

Lizbeth Juliana Castañeda Palomino / Código ORCID: 0009-0001-6409-9965 / DNI: 70907487

**ASESOR:**

Dr. Juan Taumaturgo Medina Collana / Código ORCID: 0000-0002-3625-8308 / DNI: 06213328

**LUGAR DE EJECUCIÓN:**

Laboratorio de operaciones unitarias y procesos de la Universidad Nacional del Callao, ubicado en Bellavista, provincia del Callao, departamento de Lima.

**UNIDAD DE ANÁLISIS**

Solución de hipoclorito de sodio obtenido mediante una celda electrolítica

**TIPO / ENFOQUE / DISEÑO DE INVESTIGACIÓN:**

Aplicativo / Cuantitativo / Experimental

**TEMA OCDE:** 2.4.2 Ingeniería de procesos

## HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

La presente Tesis es Sustentada por la señorita Bachiller **ALANIA MEDRANO YELTSINA JOYCI** y la señorita Bachiller **CASTAÑEDA PALOMINO LIZBETH JULIANA** ante el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS** conformado por los siguientes Profesores Ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

Ing. Mg.	PABLO BELIZARIO DIAZ BRAVO	PRESIDENTE
Ing. Mg.	POLICARPIO AGATON SUERO IQUIAPAZA	SECRETARIO
Ing. Dr.	CESAR CUBA GUTIERREZ	VOCAL
Ing. Mg.	IPANAQUE MAZA CALIXTO	SUPLENTE
Ing. Mg.	JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA	ASESOR

Tal como está asentado en el Libro de actas N° 2, Folio N° 157 y Acta N° 338 de fecha 21 de junio del 2024, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Tesis sin Ciclo de Tesis, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 27 del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Callao, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 099 – 2021 – CU del 30 de junio de 2021.

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA N.º 338 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS SIN CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

LIBRO 02 FOLIO N.º 157 ACTA N.º 338 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS SIN CICLO DE TESIS  
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

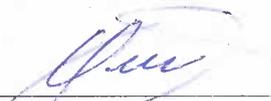
A los veintiún días del mes de junio del 2024, siendo las 11:00 h, se reunió en el auditorio de la Facultad de Ingeniería Química el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero de la **Facultad de Ingeniería Química**, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la **Universidad Nacional del Callao**:

Ing. DIAZ BRAVO PABLO BELIZARIO	: Presidente
Ing. SUERO IQUIAPAZA POLICARPO AGATON	: Secretario
Ing. GUTIÉRREZ CUBA CÉSAR	: Vocal
Ing. MEDINA COLLANA JUAN TAUMATURGO	: Asesor

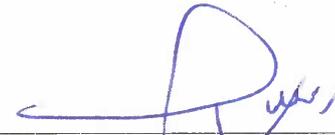
Se dio inicio al acto de sustentación de la tesis de las Bachilleres **CASTAÑEDA PALOMINO LIZBETH JULIANA** y **ALANIA MEDRANO YELTSINA JOYCI**, quienes, habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico, sustentan la tesis titulada **"SÍNTESIS DE HIPOCLORITO DE SODIO MEDIANTE UNA CELDA ELECTROLÍTICA"**

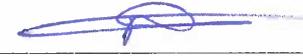
Con el quórum reglamentario de ley, se dio inicio a la sustentación de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la sustentación y la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado y efectuadas las deliberaciones pertinentes, acordó: Dar por *Aprobado* con la escala de calificación cualitativa *bueno*..... y calificación cuantitativa *15*....., la presente sustentación, conforme a lo dispuesto en el Art. 24 del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N.º 150-2023-CU del 15 de junio del 2023.

Se dio por cerrada la sesión a las *12:00* horas del día *21*..... del mes y año en curso.

  
Ing. DIAZ BRAVO PABLO BELIZARIO  
Presidente

  
Ing. SUERO IQUIAPAZA POLICARPO AGATON  
Secretario

  
Ing. GUTIÉRREZ CUBA CÉSAR  
Vocal

  
Ing. MEDINA COLLANA JUAN TAUMATURGO  
Asesor

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo lo dedico a Dios por darme salud, sabiduría y bendición para poder lograr concluir mi carrera.

A mi madre Fidelina por ser mi fuerza, mi pilar, mi inspiración y mi motivación en todo lo que soy y en todo lo que hago, por su amor, sus palabras de aliento y su apoyo incondicional.

A mis abuelos Marcela y Flavio por sus consejos que hicieron de mí una mejor persona, a mi tío Elmer por enseñarme el valor de la perseverancia y a todas las personas que de una u otra manera han contribuido para el logro de mis objetivos.

Yeltsina Joyci Alania Medrano

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo lo dedico a mis padres Rubén y Catalina y a mi hermana Dayanne, quienes en todo momento estuvieron conmigo brindándome su amor y apoyo, además de hacer todo el esfuerzo durante todos estos años para que lograra llegar hasta aquí y poder culminar una etapa más en mi vida.

Finalmente lo dedico también a todas aquellas personas entre familiares y amigos, que estuvieron presentes durante todo este proceso mostrándome su apoyo moral.

Lizbeth Juliana Castañeda Palomino

## **AGRADECIMIENTO**

Nuestro agradecimiento va dirigido primeramente a todas las personas que conforman la Universidad Nacional del Callao, institución que nos abrió sus puertas para ser parte de ella, así también a los profesores que son personas de gran sabiduría quienes nos brindaron su conocimiento para llegar al punto en el que nos encontramos.

Agradecemos especialmente a nuestro asesor de tesis el ingeniero Dr. Juan Medina Collana por guiarnos durante todo el desarrollo de nuestra tesis.

Y para finalizar, también agradecemos a los miembros del jurado del proyecto de tesis Ing. Pablo Belizario Diaz Bravo, Ing. Policarpo Agaton Suero Iquiapaza, Ing Cesar Cuba Gutierrez, quienes formaron parte del desarrollo de la investigación y que contribuyeron con sus conocimientos.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	4
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.1.Descripción de la realidad problemática	11
1.2.Formulación del problema	13
1.2.1. Problema general	13
1.2.2. Problemas específicos	13
1.3.Objetivos de la investigación	13
1.3.1. Objetivo general	13
1.3.2. Objetivos específicos	13
1.4.Justificación	13
1.5.Delimitantes de la investigación	14
1.5.1. Teórico	14
1.5.2. Temporal	15
1.5.3. Espacial	15
II. MARCO TEÓRICO	16
2.1.Antecedentes	16
2.1.1. Antecedentes internacionales	16
2.1.2. Antecedentes nacionales	18
2.2.Bases teóricas	20

2.2.1. Electrolisis de la solución acuosa de NaCl	20
2.2.2. Hipoclorito de sodio	21
2.2.3. Proceso de obtención de Hipoclorito de sodio	26
2.2.4. Indicadores de evaluación de rendimiento de la celda electrolítica	29
2.3. Marco Conceptual	32
2.3.1. Electrolisis	32
2.3.2. Componentes de la celda electrolítica	32
2.3.3. Características de las membranas de intercambio iónico	35
2.4. Definición de términos básicos	36
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	38
3.1. Hipótesis	38
3.1.1. Operacionalización de variable	38
IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO	40
4.1. Diseño de investigación	40
4.2. Método de investigación	42
4.3. Población y muestra	45
4.3.1. Población	45
4.3.2. Muestra	45
4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado	45
4.5. Técnicas e instrumentos de la recolección de información	46
4.5.1. Técnicas de recolección de datos	46
4.5.2. Instrumentos de recolección de datos	46
4.6. Análisis y procesamiento de datos	48
4.6.1. Procesamiento de datos	48
4.6.2. Análisis de datos	51

4.7. Aspectos Éticos en Investigación	52
V. RESULTADOS	53
5.1 Resultados descriptivos	53
5.2 Resultados inferenciales	58
5.3 Otros resultados estadísticos	65
5.3.1 Efecto de la concentración inicial de la salmuera	65
5.3.2 Efecto de la intensidad de corriente de electrolisis	67
5.3.3 Efecto del tiempo de electrolisis	68
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	69
6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	69
6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares	70
6.3 Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes	72
VII. CONCLUSIONES	73
VIII. RECOMENDACIONES	74
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
ANEXOS	84
ANEXO 1: Matriz de Consistencia	85
ANEXO 2: Fotografías del desarrollo del experimento	86
ANEXO 3: Estandarización de la solución de sulfato de sodio 0.1 N	88

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades físicas del hipoclorito de sodio	22
Tabla 2 Operacionalización de las variables	39
Tabla 3 Factores y niveles de experimentación	40
Tabla 4 Matriz de experimentación	41
Tabla 5 Factores y niveles de experimentación	49
Tabla 6 Resultados de la primera experimentación	49
Tabla 7 Cuadro detallado de la experimentación	51
Tabla 8 Tipo de factores de investigación	52
Tabla 9 Concentración de hipoclorito de sodio	53
Tabla 10 Porcentaje de cloro útil	54
Tabla 11 Concentración final de hipoclorito de sodio y porcentaje de cloro útil final	55
Tabla 12 Variación de la intensidad de corriente con respecto al tiempo	56
Tabla 13 Consumo específico de energía	57
Tabla 14 Concentración de hipoclorito de sodio y consumo específico de energía	58
Tabla 15 Información de factores	59
Tabla 16 Concentración promedio de hipoclorito de sodio	60
Tabla 17 Consumo específico de energía	62
Tabla 18 Concentración de hipoclorito de sodio y consumo específico de energía	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de cloración de solución acuosa de hidróxido de sodio	27
Figura 2 Celda electrolítica de producción de hipoclorito de sodio	28
Figura 3 Variables de operación y respuesta en la celda de membrana	42
Figura 4 Esquema de celda electrolítica	48
Figura 5 Intensidad versus Tiempo de la primera experimentación	56
Figura 6 Grafica de efectos principales para concentración de NaClO	61
Figura 7 Gráfica de efectos principales para consumo específico de energía	63
Figura 8 Diagrama de parteo de efectos estandarizados en concentración de NaClO	65
Figura 9 Efecto de la concentración inicial de la salmuera en el cloro útil	66
Figura 10 Efecto de la concentración inicial de la salmuera en el hipoclorito de sodio	66
Figura 11 Efecto de la intensidad de corriente de electrolisis en el hipoclorito de sodio	67
Figura 12 Efecto del tiempo de electrolisis en el hipoclorito de sodio	68

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

**A:** Amperio

**CEM:** Membrana de intercambio catiónico

**cm:** Centímetros

**E:** Energía

**g:** Gramos

**h:** Hora

**ISO:** Organización Internacional de Normalización

**L:** Litros

**m:** Metro

**min:** Minutos

**mL:** Mililitros

**N:** Normalidad

**pH:** Potencial de hidrogeno

**T:** Temperatura

**V:** Volumen

**W:** Watt

## RESUMEN

El hipoclorito sódico (NaClO) se utiliza a gran escala para la desinfección del agua, blanqueo de tejidos y eliminación de olores. Se prefiere el uso de NaClO debido al riesgo medioambiental que genera el cloro líquido asociado al almacenamiento y a su transporte. El objetivo de la investigación fue la generación electroquímicamente de hipoclorito de sodio (NaClO) a partir de una solución acuosa de cloruro de sodio. Se estudiaron diferentes condiciones operativas que afectan el proceso de la generación de hipoclorito de sodio (NaClO) que incluye el potencial eléctrico (6, 8 y 10 V), concentración de cloruro de sodio (80, 100 y 120 g/L) y tiempo de electrolisis (30, 45 y 60 minutos). Para analizar el efecto de los factores con respecto a la variable respuesta como la concentración de hipoclorito de sodio y consumo de energía por kilogramo de hipoclorito producido se utilizó un diseño factorial de 2 niveles para cada factor. Concluyendo que las mejores condiciones de operación se produjeron cuando el potencial eléctrico aplicado fue de 10 V, concentración de cloruro de sodio 120 g/L y tiempo de tratamiento de 60 minutos alcanzando una concentración de 2.276 g/L de NaClO y un porcentaje de cloro libre de 0.22 %. Así mismo, el consumo de energía por kilogramo de hipoclorito se encuentra en el rango de 235 y 3192 kWh/kg NaClO.

**Palabras claves:** Hipoclorito de sodio; electrolisis; cloruro de sodio; consumo de energía.

## ABSTRACT

Sodium hypochlorite (NaClO) is used on a large scale for water disinfection, fabric bleaching and odor removal. NaClO is preferred the use due to the environmental risk posed by liquid chlorine associated with storage and transportation. The objective of the investigation was the electrochemical generation of sodium hypochlorite (NaClO) from an aqueous solution of sodium chloride. Different operating conditions that affect the process of sodium hypochlorite (NaClO) generation were studied, including electrical potential (6, 8 and 10 V), sodium chloride concentration (80, 100 and 120 g/L) and electrolysis time (30, 45 and 60 minutes). To analyze the effect of the factors with respect to the response variable, such as the concentration of sodium hypochlorite and energy consumption per kilogram of hypochlorite produced, a 2-level factorial design was used for each factor. Concluding that the best operating conditions occur when the electrical potential applied was 10 V, sodium chloride concentration 120 g/L and treatment time of 60 minutes, reaching a concentration of 2.276 g/L of NaClO and a free chlorine percentage of 0.22%. Likewise, the energy consumption per kilogram of hypochlorite is in the range of 235 and 3192 kWh/kg NaClO.

Keywords: Sodium hypochlorite; electrolysis; sodium chloride; energy consumption.

## INTRODUCCIÓN

El hipoclorito de sodio o hipoclorito sódico es un compuesto químico altamente oxidante que se usa a gran escala en industrias como la agricultura, industria química, pinturas, industrias de alimentación, industrias del cristal, papeleras y farmacéuticas. En la industria textil debido a que este compuesto destruye muchos colorantes se usa como blanqueante. Además, este compuesto es un agente eficaz en la eliminación de ciertos virus, bacterias y microorganismos, aunque no es tan eficaz ante hongos [1].

El cloro gas reacciona con el hidróxido de sodio para formar hipoclorito de sodio, esta reacción genera un equilibrio químico entre sus diferentes componentes, pero a pesar de establecerse un equilibrio en esta reacción el hipoclorito sódico tiende siempre a descomponerse progresivamente, reduciendo su concentración. Debido a que el cloro es un gas y siempre tiende a evaporarse progresivamente del agua, el equilibrio se desplaza hacia la formación de cloro para compensar el que se ha perdido. Así mismo, la presencia excesiva de hidróxido de sodio permite la precipitación de la cal. Debido al significativo riesgo de manipulación del cloro gas y los inconvenientes descritos en el uso de hipoclorito de sodio, y unidos con el costo de adquisición, transporte y acumulación, se están utilizando sistemas de generación de cloro in situ por electrolisis de cloruro sódico [17].

Entre los procesos de electrólisis de cloruro sódico están la electrólisis con celda de diafragma, la electrólisis con celda de membrana y la electrólisis con celda de mercurio [2].

La electrólisis con celda de membrana es la más recomendada por ofrecer mayores ventajas en el proceso de electrólisis de cloro gaseoso y por su bajo consumo de energía [24].

Los resultados de concentraciones de hipoclorito de sodio no fueron lo que se esperaba (30000-60000 ppm) ya que se obtuvieron resultados inferiores, pero estas concentraciones se pueden diluir (50 a 200 ppm) y utilizar con un tiempo de contacto de 1 a 2 minutos para reducir la carga microbiana. El objetivo de este trabajo experimental fue estudiar la síntesis de hipoclorito de sodio a nivel de laboratorio mediante una celda electrolítica.

## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Descripción de la realidad problemática

El hipoclorito de sodio es un agente oxidante fuerte, buen desinfectante, blanqueador y de gran consumo en la vida cotidiana debido a su amplia aplicación. En la actualidad se está extendiendo que los consumidores produzcan sus propias soluciones de hipoclorito, utilizando celdas electrolíticas por electrólisis de soluciones de cloruro sódico, debido a los riesgos ambientales asociados al transporte, almacenamiento y manipulación de grandes volúmenes de cloro líquido. Por otro lado, se evidencian diversas enfermedades que se propagan por contacto con superficies contaminadas e ingestión alimentos crudos, entre las principales fuentes de transmisión de patógenos están involucrados los vegetales como una fuente importante de patógenos y contaminantes químicos. Con el fin de reducir la cantidad de microorganismos hasta un nivel que no afecte la salud de los consumidores, se viene utilizando el cloro como desinfectante para su lavado debido a su bajo costo y una gran eficacia [31].

En las terapias endodónticas es de suma importancia el uso de instrumentación los cuales deben ser asépticos, asimismo, estos tratamientos necesitan ser complementados por acciones químicas para asegurar que no haya proliferación de microorganismos, para ellos se usan soluciones irrigadoras como el hipoclorito de sodio, el cual es considerado de alto grado bactericida [8].

El agua potable es un recurso de vital importancia para la vida que puede ser consumida sin riesgo de contraer enfermedades, sin embargo, el acceso a ella para poblaciones alejadas de las ciudades es difícil ya que las personas carecen de servicios de purificación y en las grandes metrópolis su consumo es abundante. La potabilización del agua consiste en la eliminación de compuestos volátiles, precipitación de

impurezas, filtración y desinfección, en esta última etapa es donde se utiliza el cloro que proviene del hipoclorito de sodio [26].

El nuevo coronavirus (COVID-19) y su rápida evolución, han causado decesos innumerables, por lo que se ha tenido que tomar medidas de prevención para garantizar el control de infecciones por contacto, higiene de manos, equipos de protección personal, desinfección y limpieza del entorno, para tales efectos se resalta la acción del hipoclorito de sodio frente a otros desinfectantes como el cloruro de benzalconio, la povidona yodada y el alcohol etílico diluido [15].

Los compuestos oxigenados de cloro han sido utilizados en demasía en diversos tipos de industrias, como en la medicina, la potabilización del agua y en los hogares como blanqueadores y principalmente como agente desinfectante. El cloro en su estado natural al ser inestable conlleva riesgos de seguridad en su producción, almacenamiento y transporte, como alternativa para los mismos fines se aumentó la utilización del hipoclorito de sodio en menor concentración que se han obtenido mediante la electrolisis [16].

En la industria textil se requiere el blanqueamiento de diversas fibras por lo que se usa el hipoclorito de sodio como agente blanqueador y en parasitología se necesita la esporulación in vitro de quistes de protozoos por lo que se usa en este campo por su poder fungicida [1].

Los mejores resultados en la síntesis se obtuvieron analizando tres factores: concentración inicial de la disolución del cloruro de sodio, el tiempo y la intensidad de corriente [16].

Frente a la problemática mencionada, se ha investigado la síntesis de hipoclorito de sodio mediante una celda electrolítica a nivel de laboratorio usando soluciones de cloruro de sodio teniendo en cuenta estos tres factores (concentración inicial de cloruro de sodio, tiempo e intensidad) para obtener un mejor rendimiento.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema general**

¿Se podrá efectuar la síntesis de hipoclorito de sodio a través de una celda electrolítica a nivel de laboratorio?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- ¿Cuáles serán los factores de operación de la celda electrolítica más adecuadas para sintetizar hipoclorito sódico?
- ¿Cuál es el consumo específico de energía que se requiere para la síntesis de hipoclorito de sodio por medio de una celda electrolítica?

## **1.3. Objetivos de la investigación**

### **1.3.1. Objetivo general**

Efectuar la síntesis de hipoclorito de sodio a través de una celda electrolítica a nivel de laboratorio.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Seleccionar los factores de operación de la celda electrolítica más adecuados para sintetizar hipoclorito sódico
- Determinar el consumo específico de energía que se requiere para la síntesis de hipoclorito de sodio por medio de una celda electrolítica

## **1.4. Justificación**

En Perú las industrias o empresas que utilizan el hipoclorito de sodio en sus procesos, tienen que comprar dicha sustancia por toneladas y a un precio exuberante a pesar de no utilizar todo el contenido comprado ya que existe una sola empresa “Quimpac” que proporciona este producto.

El hipoclorito de sodio es una sustancia muy inestable por lo que al ser transportada y almacenada su concentración se afecta, lo que genera un inconveniente en industrias que utilizan dicha sustancia a una determinada concentración. Por esta razón es preferible utilizar

disoluciones recién preparadas de hipoclorito de sodio, una opción viable es la preparación de esta disolución mediante la electrolisis de cloruro de sodio, pues las concentraciones que se obtienen en este proceso son adecuadas por ejemplo en la desinfección del agua.

Por otra parte, hoy en día existen tres distintos procesos de electrólisis para la descomposición de cloruro de sodio, siendo el proceso de electrólisis con celda de amalgama el más conocido, pero a la vez el más contaminante ya que los efectos del mercurio persisten en el medio ambiente durante largos periodos de tiempo e incluso el mercurio se moviliza y aparece en regiones que están muy alejadas de la fuente de emisión. El segundo proceso más conocido es el proceso de electrolisis con celda de diafragma, pero este proceso genera hidróxido de sodio de baja pureza y cloro de baja calidad lo que influye en la calidad del hipoclorito de sodio.

Para promover la producción de hipoclorito de sodio mediante una tecnología limpia, barata y que genere productos de calidad en empresas que emplean esta sustancia se ha planteado la síntesis de hipoclorito de sodio a nivel laboratorio mediante una celda electrolítica.

## **1.5. Delimitantes de la investigación (teórico, temporal y espacial)**

### **1.5.1. Teórico**

El proyecto no conto con fuente de información suficiente que trate el tema de instalación del equipo de celda electrolítica, además este equipo procedente de China no trajo un manual de instalación por lo que se necesitó de la ayuda de un ingeniero experto en la instalación de esta tecnología para poder realizar la construcción del equipo de síntesis de hipoclorito de sodio.

### **1.5.2. Temporal**

El proceso de obtención de hipoclorito de sodio mediante celda electrolítica para hacer el análisis de concentraciones requiere de un tiempo de proceso largo y después del proceso al poco tiempo de obtener la muestra de hipoclorito de sodio para evitar la descomposición rápida se debe realizar el análisis rápido para obtener resultados que sean confiables además debido a que la descomposición del producto hipoclorito de sodio se dilata al aumentar la temperatura se esperó a la temporada de invierno para realizar la parte experimental.

### **1.5.3. Espacial**

La investigación se desarrolló a nivel laboratorio en el laboratorio de operaciones unitarias y procesos de la Universidad Nacional del Callao, ubicado en Bellavista, provincia del Callao, departamento de Lima. Para las pruebas experimentales se preparó soluciones sintéticas de cloruro de sodio de diferentes concentraciones.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

#### 2.1.1. Antecedentes internacionales

En el trabajo de investigación denominado “Estudio de la obtención electrolítica “in situ” de disoluciones acuosas de hipoclorito de sodio”, los autores estudiaron el proceso de obtención electrolítica in situ de las disoluciones acuosas de hipoclorito de sodio para mejorar las tecnologías existentes y se llevó a cabo mediante el diseño experimental factorial de la influencia del rendimiento de la síntesis electrolítica del hipoclorito de sodio a partir del cloruro de sodio donde analizaron factores como concentración inicial de la solución de cloruro de sodio, tiempo y la intensidad de corriente. Los mejores resultados que se mostraron fueron a 100 g/L de cloruro de sodio, 6 horas y 7 A, y se concluyó que se obtienen soluciones con mayor porcentaje de cloro activo a causa de la inhibición de la reducción catódica [16].

En la tesis “Generación de hipoclorito con electrodos modificados para el tratamiento de contaminantes de aguas residuales”, el autor menciona que el hipoclorito de sodio se usa a una gran escala para la purificación de superficies, eliminación de olores, desinfección de agua por lo que su objetivo fue evaluar el efecto del tratamiento con NaOCl al 5% sobre la fuerza de adherencia de un cemento de resina mediante la actividad electrocatalítica de los electrodos de Pb/PbO<sub>2</sub> y C/PbO<sub>2</sub>. Los mejores resultados para la mayor producción de hipoclorito de sodio fueron 20 g/L de NaCl, pH>10, 5-10 °C de temperatura, concluyendo que la solución de cloruro de sodio fue más eficiente que la salmuera y agua de mar para la producción de hipoclorito de sodio [23].

En la investigación “Obtención de un agente desinfectante a partir de la electrólisis de cloruro de sodio para el tratamiento de agua potable”, los autores exponen que debido a que existen problemas para llevar agua potable a zonas rurales costeras de su país y en ausencia de adecuados

mecanismos para tener un sistema integral de cobertura para toda su población su objetivo fue la obtención de un agente desinfectante a partir de la electrolisis de cloruro de sodio. Para obtener la mejor concentración de este agente desinfectante realizaron un análisis de variable multinivel y así compararon el efecto que tienen las variables de operación seleccionadas sobre la concentración del agente desinfectante obtenido. Según los resultados obtenidos las mejores condiciones de operación para la obtención del agente desinfectante a partir de la electrolisis de cloruro de sodio fueron de 27 g/L de concentración de sal, 6,7 A/dm<sup>2</sup> de densidad de corriente (equivalente a 4.84 A), agitación de 300 RPM, obteniéndose un agente desinfectante de 3.813 g/L para un tiempo de operación de 20 minutos, concluyendo que para que el proceso de electrolisis se realice en las mejores condiciones de experimentación se debe determinar las propiedades termodinámicas y los parámetros cinéticos de la reacción electroquímica [11].

En el trabajo de investigación denominado “Diseño de un sistema de generación de hipoclorito de alta eficiencia combinando electrólisis asistida por membrana de intercambio catiónico con una corriente de recuperación de cloro gaseoso”, los autores estudiaron la generación de hipoclorito para la desinfección de agua mediante el diseño de un proceso de generación de iones de hipoclorito que implica la instalación de membrana de intercambio catiónico (CEM) para celda de electrolisis convencional para mejorar la estabilidad y controlabilidad de Cl<sub>2</sub> que permite aumentar la tasa de producción y la eficiencia de la generación de hipoclorito. Las celdas de asistidas por CEM acompañadas de recuperación de Cl<sub>2</sub> construido con poliéter éter cetona sulfonada (SPEEK), Nafion 115 o Nafion 324 exhibió tasas de producción de hipocloritos mejoradas (1.66, 1.65, 1.70 mol m<sup>-2</sup>min<sup>-1</sup> respectivamente) y concentración de producto (51.7, 51.4, 52.8 mM, respectivamente) en comparación con el mismo sistema sin CEM (tasa de producción 1.46

mol m<sup>-2</sup>min<sup>-1</sup> a una concentración de salida de 45.5mM) con una densidad de corriente de 300 mAcm<sup>-2</sup> [13].

En su estudio denominado “Efectos de los materiales catódicos y la separación de electrodos en la producción electroquímica in situ de hipoclorito de sodio utilizando un reactor de un solo lote”, los autores dan a conocer los efectos al utilizar acero, aluminio, zinc como materiales catódicos disponibles y económicos, y también el efecto que produce el cambio de espacio entre electrodos al producir electroquímicamente in situ el hipoclorito de sodio con celda electroquímica de un solo lote. Cuando los cátodos son de zinc la producción es mayor a que cuando son de aluminio o de acero, a todas las separaciones de cátodos excepto a 14 cm cuando la tasa de producción con cátodo de acero es mayor que el cátodo de aluminio. Concluyendo que la mayor producción de hipoclorito de sodio fue para el electrodo de zinc con una superficie de 66,3 cm<sup>2</sup>, separado del ánodo de grafito 8 cm, en un tiempo de electrolisis de 120 minutos, y un voltaje de 9,5 V con densidad de corriente 176,5 mA.cm<sup>-2</sup> a una temperatura de 25 °C, dando una concentración de hipoclorito de sodio de 0.054% [22].

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

En la tesis “Química en las celdas electrolíticas para la producción de hipoclorito de sodio”, el autor expone que a la problemática para la desinfección del agua de consumo humano su objetivo fue brindar información sobre la química desarrollada en las celdas electrolíticas cuando se da la producción de hipoclorito de sodio por medio de celdas electrolíticas a base de salmuera. De acuerdo a los resultados obtenidos la pérdida de efectividad de la solución de hipoclorito de sodio se da cuando no se conserva a temperaturas menores de 10 °C y a un pH mayor a 10.5 y en caso de no poder lograr acondicionar a esa temperatura se le pueda agregar 0.5% de NaOH, y concluyo que al realizar el proceso de electrolisis de la salmuera no solo sirve en la

producción de hipoclorito de sodio sino también permite obtener hidróxido de sodio con la concentración necesaria para alcanzar la calidad comercial [6].

En el trabajo de investigación denominado “Estudio para la obtención de hidróxido de sodio a partir del yacimiento de salmueras Bayovar-Sechura”, la autora menciona que debido a que la soda caustica es uno de los productos con mayor actividad industrial ya que se emplea en la fabricación de diversos productos como jabones, pinturas, blanqueada entre otras aplicaciones, tuvo como objetivo desarrollar el estudio de la obtención de hidróxido de sodio a partir del yacimiento de salmuera Bayovar – Sechura, mediante el método electrolítico de celdas de membrana. Los resultados obtenidos del análisis de la salmuera son 11644 ppm de cloruros, 19195 ppm de NaCl, 15.1% de KCl, 0.96% de  $\text{Ca}^{+2}$ , 4.1% de  $\text{Mg}^{+2}$  y 4.7 g/L  $\text{SO}_4^{-2}$  y 117504 ppm de solidos totales disueltos, concluyendo que el método electrolítico de las celdas de membranas es el método más óptimo para la obtención de un producto de calidad para el mercado [27].

En el artículo “Factors Influencing the Formation of Sodium Hydroxide by an Ion Exchange Membrane Cell”, los autores exponen los principales factores que influyen para la producción de hidróxido de sodio mediante una celda electrolítica con membranas de intercambio iónico. Los parámetros que los autores consideraron fueron concentración inicial de NaOH, voltaje y temperatura, utilizando soluciones de NaCl de concentración 40 g/L y un tiempo de 150 minutos. Los resultados que ellos obtuvieron fueron que la conductividad y el pH tiene tendencia lineal creciente con el tiempo que se dio para la electrolisis y lograron obtener un promedio de 80.2% de una eficiencia de corriente eléctrica [28].

## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1. Electrolisis de la solución acuosa de NaCl

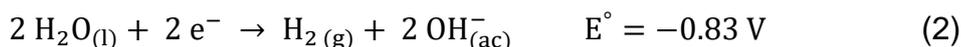
La electrolisis de NaCl tiene iones  $\text{Cl}_{(\text{ac})}^-$ ,  $\text{Na}_{(\text{ac})}^+$  pero también tiene  $\text{H}_2\text{O}_{(\text{l})}$  [17].

#### Reducción (Cátodo)

En esta solución tenemos dos especies que están dispuestas a reducirse. El ion sodio que pasa de estado de oxidación +1 a estado de oxidación 0, produciéndose la siguiente semireacción:



El agua también puede reducirse porque el hidrogeno pasa de estado de oxidación +1 a 0 según la siguiente semireacción:



Para poder decidir que semireacción ocurre es necesario comparar potenciales, y el que tenga el potencial mayor tendrá más habilidad para tomar electrones.

Por lo tanto, el potencial mayor es el del agua porque -0.83 V es mayor que -2.71 V y por eso se produce la reducción del agua.

#### Oxidación (Ánodo)

En el ánodo solo se produce una sola especie el cloro ya que se va retirando electrones, como se muestra en la siguiente reacción:



La reacción redox global sería de potencial negativo ya que no es espontánea porque quien se encarga de que se produzca la reacción es la energía eléctrica suministrada por la pila.

La membrana de intercambio iónico de la celda electrolítica permite que los iones de sodio ( $\text{Na}_{(\text{ac})}^+$ ) pasen de la primera a la segunda parte de la cámara donde se da la reacción con los iones de hidróxido ( $2 \text{OH}_{(\text{ac})}^-$ ) para producirse hidróxido de sodio, la reacción generada por la electrolisis de la salmuera es de la siguiente forma:



### 2.2.2. Hipoclorito de sodio

El hipoclorito de sodio acuoso ( $\text{NaClO}$ ), es un compuesto químico fuertemente oxidante, en estado de oxidación +1. Tienen ligero color amarillo, además de olor característico.

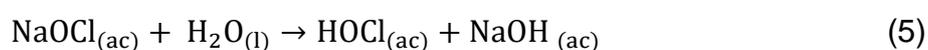
Debido a su inestabilidad del hipoclorito de sodio sólido, es más común encontrarse en solución acuosa. La disolución acuosa de hipoclorito de sodio solo permanece estable en pH básico.

La solución de hipoclorito de sodio es más estable cuando se encuentra en su mayor pureza. Comercialmente el hipoclorito de sodio debido a sus concentraciones se encuentra en dos grandes grupos, disoluciones acuosas con concentración inferior al 10% de cloro activo y disoluciones acuosas con concentración superior al 10% de cloro activo [35].

El hipoclorito de sodio se usa en desinfección, cloración de aguas de proceso o para bebida, blanqueado, control de olor, eliminación de pelo en la industria del cuero, eliminación de lógamo y algas en piscinas. Para la eliminación de olores se añade el hipoclorito a las aguas residuales industriales. El hipoclorito neutraliza el gas de sulfuro de hidrogeno y amonio [6].

También se utiliza para la detoxificación de baños de cianido en industrias del metal. Este hipoclorito se puede utilizar para la prevención de la formación de las algas y el crecimiento biológico en torres de enfriamiento.

En las casas, el hipoclorito de sodio se usa frecuentemente para la purificación y desinfección de la casa. Mediante la adición de hipoclorito de sodio en agua, se genere acido hipocloroso ( $\text{HOCl}$ ).



El ácido hipocloroso se divide en ácido hipoclorito y oxígeno. El átomo de oxígeno es un oxidante muy fuerte y es efectivo contra las bacterias, virus y hongos.

También se usa en el tratamiento endodóntico de conductos de manera convencional, con irrigación de hipoclorito de sodio y medicación con hidróxido de calcio. Los irrigantes junto con los medicamentos intraconductos aumentan la posibilidad de eliminación de bacterias, toxinas y endotoxinas, presentes en el conducto infectado y facilitan la remoción del tejido necrótico y de la dentina del conducto radicular que se encuentra contaminada.

- Propiedades físicas

Las propiedades físicas del hipoclorito de sodio se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1**

*Propiedades físicas del hipoclorito de sodio*

<b>Propiedades</b>	<b>Valor</b>
Peso Molecular (g/mol)	74.4
Estado Físico	Líquido penetrante e irritante
Punto de Ebullición (°C) (760 mmHg)	120 (Concentración cloro activo: 6.5%) 40 (5% de NaOCl en agua)
Punto de Fusión (°C)	8.6 (Concentración cloro activo: 6.5%) -6 (5% de NaOCl en agua)
Presión de vapor (mmHg)	17.5 a 20 (5% de NaOCl en agua)
Ph	12 (Concentración cloro activo: 6.5%) 9-10 5% de NaOCl en agua)

- Factores que influyen en la descomposición de hipoclorito de sodio

El ion hipoclorito es mucho más estable que el ácido hipocloroso. Desde el inicio de la producción de hipoclorito de sodio esta solución se descompone gradualmente hasta que se pierda totalmente la concentración de esta solución. Sin embargo, la descomposición se puede controlar para extender la vida útil de esta solución con propósitos prácticos y pueden prepararse soluciones relativamente estables.

Para soluciones comerciales de hipoclorito de sodio, la estabilidad depende de los siguientes factores [6]:

- Concentración de la solución de hipoclorito.
- Alcalinidad o valor de pH de la solución
- Temperatura de la solución tanto durante la preparación como en el almacenaje
- Concentración de impurezas
- Exposición a la luz
- Concentración de la solución de hipoclorito.

Las soluciones de hipoclorito de sodio a baja concentración se descomponen más lentamente que las de alta concentración. El almacenamiento de las soluciones altamente concentradas, bajo condiciones adversas, causara que, en un determinado tiempo, su concentración sea más baja, que si se la prepara de baja concentración [6].

- Alcalinidad o valor de pH de la solución

Tienen un efecto fundamental en la estabilidad de la solución de hipoclorito. Un valor de pH que esta entre 9.5 y 10.5 dará soluciones más estables, un exceso de álcali va proteger a la solución de hipoclorito del efecto dañino de la luz, no hay evidencia de que una alcalinidad mayor a 0.5% como hidróxido de sodio, tenga un efecto beneficioso en la estabilidad de las soluciones de hipoclorito, más aún, el exceso de alcalinidad tiende a descomponer al hipoclorito y causa la precipitación gradual de algunas impurezas [6].

- Temperatura de la solución

La temperatura influye en la estabilidad de las soluciones de hipoclorito durante la producción como en el almacenamiento. Para la producción de una solución de hipoclorito de baja concentración, la temperatura nunca deberá exceder de 30°C, de otra parte, temperaturas bajas también contribuyen a la estabilidad de las soluciones del desinfectante [6].

- Concentración de impurezas

Casi el total de las sales metálicas y óxidos son catalizadores de la descomposición de las soluciones de hipoclorito. En orden descendiente los más energéticos son los óxidos de níquel, cobalto, cobre, hierro, manganeso, mercurio, aluminio, plomo, cinc, estaño, magnesio y bario. Concentraciones de hierro de 0.5 mg/l causan una rápida degradación. Algunos aniones solubles como cloratos, cloruros, nitratos y carbonatos

también afectan la estabilidad de las soluciones de hipoclorito de sodio adversamente, así también los compuestos de amonio y amoniaco.

La calidad y la estabilidad de las soluciones del hipoclorito del sodio se pueden afectar por la concentración de ciertas impurezas. Trazas de metales, tales como óxidos de metales insolubles de la forma del níquel, del cobre y del cobalto, que hacen que la fuerza de blanqueo se descomponga catalíticamente, dando formación de gas de oxígeno y una disminución en la fuerza del blanqueo. Estas trazas de metal, así como el hierro, el calcio y el magnesio, forman sedimentos y puede decolorar la solución del hipoclorito. Las fuentes potenciales para estas impurezas incluyen las materias primas, el equipo de proceso y los envases de almacenaje del producto. La fuente más común para estos metales, particularmente níquel y cobre, proviene de la alimentación de la soda cáustica [6].

- Exposición a la luz

La luz es uno de los principales factores que contribuye en la aceleración de la descomposición de las soluciones de hipoclorito por lo que al ser envasado el desinfectante en envases de vidrio ambar o verde reduce drásticamente su descomposición. Sin embargo, muchos fabricantes de hipoclorito preparan con éxito el hipoclorito de sodio estable a través de la soda caustica [6].

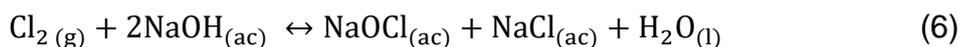
Algunas técnicas usadas por los productores para reducir al mínimo la concentración de impurezas en el producto final se mencionan a continuación:

- Filtrar la solución final del hipoclorito con un filtro de 0.5 a 1 micrón. Esto quitará las impurezas que promueven la descomposición del hipoclorito y/o degradan su apariencia visual.
- Utilizar los tanques y los sistemas alineados de la tubería de material plástico para reducir la recolección de trazas de metales.
- Utilizar el agua fresca para el paso final de la dilución.

### **2.2.3. Proceso de obtención de Hipoclorito de sodio**

**1. Cloración de solución acuosa de hidróxido de sodio:** A principios de la producción comercial, el hipoclorito de sodio se fabrica en proceso discontinuo, en el que se inyecta cloro gaseoso o líquido en una solución caústica diluida. Para evitar que suceda una sobre cloración y se mantenga el exceso de alcalinidad necesaria para la producción de una solución estable de hipoclorito de sodio, la adición de cloro debe interrumpirse antes de que se agote por completo la sosa caústica presente en la solución [6].

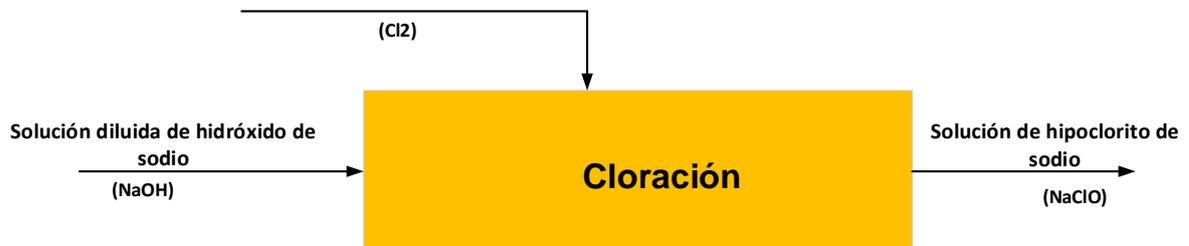
La reacción de cloro gas con hidróxido de sodio que se dan produce hipoclorito de sodio, según la siguiente reacción:



La concentración final de la solución de hipoclorito de sodio depende de la concentración inicial de la solución de soda cáustica [6].

**Figura 1**

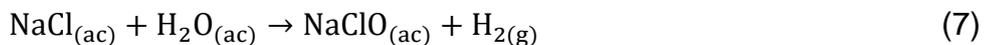
*Diagrama de cloración de solución acuosa de hidróxido de sodio*



Fuente: Rahman (2010)

**2. Generación electroquímica de hipoclorito sódico:** Los sistemas de generadores de hipoclorito sódico in situ utilizan tres consumibles (agua, sal y energía) [17].

La ecuación química general para la reacción de sal (NaCl) y agua (H<sub>2</sub>O) para formar hipoclorito (NaOCl) es [17]:



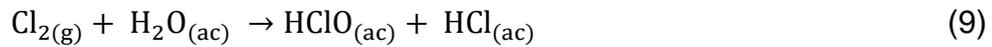
La corriente eléctrica pasa a través de una célula electrolítica y se producen reacciones de oxidación/reducción en los electrodos. Las reacciones de oxidación se llevan a cabo en el ánodo donde dos iones cloruro (Cl<sup>-</sup>) pierden un electrón cada uno para producir cloro molecular [17].

Reacción en el ánodo:



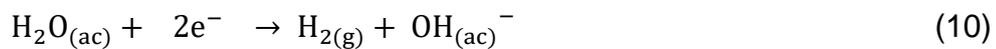
En función de los parámetros físicos y de funcionamiento de la célula (por ejemplo, la distancia entre electrodos, el potencial aplicado a la célula, etc.), también es posible producir oxidantes distintos del cloro, que pueden proporcionar una mejor eliminación de los contaminantes microbiológicos del agua y otras ventajas. Una vez producido el cloro molecular se disuelve en el agua para producir ácido hipocloroso (HOCl)

de la misma manera actúa el cloro gaseoso a granel de las bombonas [17]:

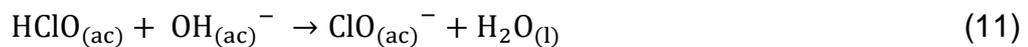


La producción de cloro se equilibra con las reacciones de reducción que se producen en el cátodo, donde el agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) se convierte en iones hidróxido ( $\text{OH}^-$ ) y hidrógeno gaseoso ( $\text{H}_2$ ) [17].

Reacción en el cátodo:



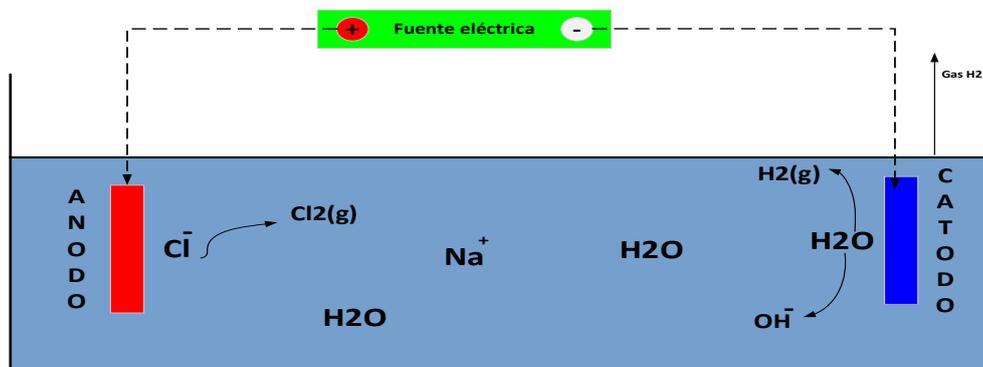
Durante la electrólisis, se produce gas hidrógeno en forma de burbujas y debe eliminarse posteriormente de la solución oxidante producida para evitar la acumulación del gas. Los iones de hidróxido producidos en el cátodo reaccionan con el ácido hipocloroso producido en el ánodo, produciendo el anión hipoclorito ( $\text{ClO}^-$ ), cuya carga se equilibra con cationes de sodio ( $\text{Na}^+$ ) procedentes originalmente de la sal [17]:



En la figura 2, muestra la celda electrolítica de producción ínsito de hipoclorito de sodio

**Figura 2**

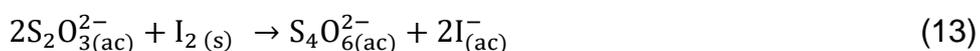
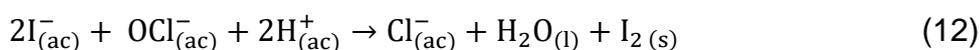
*Celda electrolítica de producción de hipoclorito de sodio*



#### 2.2.4. Indicadores de evaluación de rendimiento de la celda electrolítica

##### a) Análisis de concentración de hipoclorito de sodio

Este método se base en la teoría oxido-reducción, donde la especie oxidante del hipoclorito de sodio oxida al yoduro en exceso en medio acido. El yoduro oxidado a yodo molecular es determinado por titulación con una solución estandarizada de tiosulfato de sodio [6].



El contenido de hipoclorito de sodio puede ser calculado como porcentaje de cloro disponible (p/p) o como porcentaje de hipoclorito de sodio (p/p) mediante las siguientes formulas [6]:

$$\%Cl = \frac{(V)(N)(0.03545)(100)}{(10/250)(W)} \quad (14)$$

$$\%NaOCl = \frac{(V)(N)(0.03722)(100)}{(10/250)(W)} \quad (15)$$

Donde:

W = Peso en gramos de la muestra original (g)

V = Volumen en mililitros de la solución de Tiosulfato de Sodio 0.1 N (ml)

N = Normalidad de la solución de Tiosulfato de Sodio (N)

10/250 = Factor de dilución de la Solución Stock

(Alícuota de 10 mL tomada a partir de la solución común de 250 mL)

0.03723 = Peso miliequivalente de NaOCl

0.03545 = Peso miliequivalente de Cl<sub>2</sub>

b) Ley de Faraday de electrolisis

La estequiometria de electrolisis se define como la relación entre las cantidades de carga y de producto. Las cantidades de productos que se han formado en cada electrodo en un proceso electrolítico están regidas por la “ley de Faraday” que manifiesta lo siguiente [11].

• **Primera Ley:** La cantidad de sustancia depositada o liberada en un electrodo es directamente proporcional a la intensidad de la corriente y al tiempo que esta circula. Faraday descubrió esta ley al observar cuando una corriente que fluye a través de la celda durante un tiempo, la perdida que se da en el ánodo es igual a la ganancia de peso en el ánodo, independientemente del área de los electrones para tiempos diferentes [11].

$$m_i = \frac{Eq_i}{F} Q' \quad (16)$$

$$m_i = \frac{Eq_i}{F} * I * t \quad (17)$$

Dónde:

$m_i$ : Masa de la sustancia liberado o del electrolítico descompuesto

$Q'$ : Cantidad de electricidad o carga eléctrica

$I$ : Intensidad de corriente

$F$ : Constante de Faraday  $\rightarrow 1F = 96500C$

$Eq_i$ : Equivalente electroquímico, es la cantidad de electrolito descompuesto de la sustancia liberada por 1 culombio de electricidad

• **Segunda Ley:** Afirman que la cantidad de sustancia depositada durante la electrolisis es proporcional al peso equivalente de la sustancia. Faraday realizo un experimento cambiando el material de los electrodos utilizados, encontrando que el número de equivalentes que han sido electrolizados por una determinada cantidad de electricidad es un valor que es fijo el cual va depender del peso molecular de la sustancia en cuestión [11].

$$Eq_i = \frac{PM_i}{n} \quad (18)$$

Donde:

$PM_i$ : Peso molecular de la sustancia liberada o depositada

$n$  : Electrones intercambiados

Entonces se puede deducir que en un proceso de electrolisis se da una mayor eficiencia cuando se la intensidad de la corriente es alta durante un tiempo prolongado, que cuando la intensidad de corriente es baja durante un corto tiempo [11].

En conclusión, las leyes de Faraday para electrolisis pueden formar una ley general que conduce el proceso, expresada en la siguiente ecuación [11].

$$m_i = \frac{PM_i}{n * F} * I * t \quad (19)$$

c) Consumo específico de energía

El consumo de energía es un parámetro importante que puede emplearse para evaluar el rendimiento de la instalación de una tecnología electroquímica. La cantidad de energía consumida por unidad de masa (kg) de hipoclorito de sodio producido se estimó mediante la ecuación [21].

$$E \left( \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right) = \frac{E_{cel} \int_0^t Idt}{C_{NaClO} V} \quad (20)$$

Donde:

$E$  (kWh/kg): es el consumo de energía

$E_{cel}$  (V): es la caída de tensión en la pila o el voltaje del equipo de electrolisis.

$I$  (A): es la corriente.

$t$  (min): es el tiempo de cada prueba.

$C_{\text{NaClO}}$  (kg/L): concentración de hipoclorito de sodio en el tiempo.

$V$  (L): es el volumen inicial del cloruro de sodio, igual a 1.2 L.

Es importante señalar que las soluciones salinas son buenas conductoras eléctricas y no provocan caídas significativas de potencial eléctrico en las celdas, provocando un menor consumo de energía en dicha celda. Sin embargo, una limitación es que los productos a tratar por la electrolisis deben tener un alto contenido de minerales para permitir una buena conductividad eléctrica [21].

## **2.3. Marco Conceptual**

### **2.3.1. Electrolisis**

Es el rompimiento de una sustancia por medio de la energía eléctrica. Por lo que se usa para separar un compuesto en sus elementos [6].

Además, permite la descomposición de sustancias haciendo circular corriente eléctrica a través de ellas.

Los productos que resultan de la electrolisis dependen de:

- La naturaleza del sistema que se va electrolizar.
- La concentración que tiene el sistema
- Los electrodos que se van utilizar
- La intensidad de la corriente que se va hacer circular por la celda.

Debido a los procesos electrolíticos es posible que, se pueda obtener metales y no metales, purificar o refinar metales, depositar metal sobre objetos, etc [6].

### **2.3.2. Componentes de la celda electrolítica**

#### **A. Celda de electrolisis**

Es la de mayor uso para la producción de soluciones de hipoclorito de sodio, se pueden clasificar en dos grandes grupos de acuerdo a su

estructura, celdas de tubos y celdas de placas paralelas. Las celdas de tubos consisten en dos tubos concéntricos en el que uno de ellos hace las veces de ánodo y la otra de cátodo, y el espacio anular sirve de brecha del electrodo, este tipo se puede utilizar en operaciones de alta presión y es apropiado para aplicaciones pequeñas. Las que son de placas tienen una mayor área empacada del electrodo, por lo cual son las más ampliamente empleadas a escala industrial [35].

Esta celda está constituida por dos electrodos un ánodo y un cátodo y una membrana.

#### B. Electrodos

Son dos placas generalmente rectangulares de diferente material metálico, a los cuales se les conectara su fuente de alimentación.

La alta conductividad del electrodo ayudará a la distribución uniforme de la corriente y al potencial en el electrodo, y así se podrá disminuir el consumo específico de energía en el proceso.

Las propiedades que debe presentar el material de los electrodos son: resistencia a la corrosión, formación de óxidos aislantes en los ánodos y la deposición de películas orgánicas no conductoras [19].

- **Ánodo**

Generalmente son de titanio puro (Ti), que tiene revestimiento de óxido de iridio y rutenio ( $\text{IrO}_2$ ,  $\text{RuO}_2$ ). Los ánodos de titanio son resistentes a la salmuera acida y al cloro; pero el revestimiento es frágil y quebradizo en presencia de hierro e hidrogeno; por eso el contenido no debe ser mayor a 0.05 ppm y 1 %, respectivamente para que no se dañe el revestimiento y así evitar condiciones inseguras en la operación.

Las impurezas de la salmuera afectan al revestimiento, y a medida que este se degenere, el voltaje de la operación, se incrementa [6].

- **Cátodo**

La disociación del agua incrementa el pH debido a que presenta iones hidróxido ( $\text{OH}^-$ ). Si presenta un alto valor de pH ocurre la precipitación

de hidróxido del metal y también del  $\text{CaCO}_3$  sobre la superficie de la membrana de intercambio iónico y del electrodo.

Por lo que algunos requerimientos que debe cumplir el cátodo son: alta conductividad eléctrica, compatibilidad química con el electrolito, debe ser delgado y poroso (lo suficientemente delgado para evitar la pérdida de transferencia de masa, pero lo bastante grueso para la distribución de corriente), debe ser estable en medios oxidantes y debe tener alta conductividad iónica [6].

### C. Membrana de intercambio iónico

Consiste en una película que contiene grupos funcionales cargados. Existe muchos materiales resinosos o poliméricos utilizados en la elaboración de dichas membranas, así como distintos grupos funcionales que tienen propiedades de intercambio iónico. El principio fundamental es que la membrana de intercambio iónico consta de una estructura porosa (generalmente cadenas de polímeros entrelazadas) que contiene cargas fijas, neutralizadas con cargas opuestas móviles [19].

Las membranas de intercambio iónico se dividen en aniónicas que contienen grupos fijos cargados positivamente y catiónicas que contienen grupos fijos cargados negativamente [19].

Una vez que esta membrana entra en contacto con una solución acuosa los aniones móviles que esta contiene se pueden desplazar hacia la solución y así poder ser reemplazados por aniones presentes en la fase acuosa (a los que la membrana resulta permeable). Los cationes inmóviles, por otra parte, obstaculizan el transporte de especies positivamente cargadas que se encuentran presentes en la solución ya que estos permanecen en la fase membrana, es precisamente así que las membranas aniónicas permiten el paso de aniones a la vez que se obstaculizan el flujo de cationes. Las catiónicas operan de igual forma, pero se diferencian en que estas tienen cationes móviles y aniones fijos,

y también en que estas permiten el flujo de especies con carga positiva [19].

### **2.3.3. Características de las membranas de intercambio iónico**

Estas membranas pueden ser adaptadas para una aplicación en peculiar.

Las características principales a tener en cuenta en el momento de seleccionar una membrana de intercambio iónico para determinado proceso son [19]:

#### 1) Estabilidad química

La resistencia que tiene la membrana a degradarse con cambios en factores como la temperatura (temperatura de ablandamiento) y la concentración de las soluciones, es expresada por cambios físicos, como el color que signifique que su estructura se ha deteriorado. Por lo que es importante que su estabilidad química sea alta [19].

#### 2) Selectividad iónica

Es la disposición que tienen las membranas de permitir el pase o la discriminación de un ion según la carga, las cargas fijas determinan la selectividad del ion [19].

#### 3) Resistencia mecánica

Es indispensable que las membranas posean una alta resistencia mecánica y una poca variación de sus dimensiones para prevenir su rompimiento como consecuencia de las fuerzas que deben soportar al momento de colocarla en los módulos de electrolisis [19].

#### 4) Resistencia térmica

Es una característica que depende del polímero base, así como también del material polimérico de refuerzo. La estabilidad de las membranas perfluoradas se da hasta 100 °C, mientras que las no perfluoradas, en general no logran trabajar a temperaturas que sean superiores a los 60°C [19].

#### 5) Resistencia eléctrica

Esta resistencia depende tanto del espesor de las membranas como del tipo de grupos intercambiadores [19].

Es importante que esta resistencia sea lo más baja posible con el objetivo de minimizar al máximo el consumo de energía [19].

#### 6) Coeficiente de difusión para soluto y solvente

Este coeficiente de difusión debe ser bajo. Las membranas de intercambio iónico lamentablemente son permeables en una cierta amplitud a las moléculas no ionizadas, estas logran atravesarlas por difusión, sobre todo las que son de tamaño pequeño [19].

### 2.4. Definición de términos básicos

**Síntesis:** Formación de compuestos químicos a partir de sus elementos o compuestos más simples.

**Celdas electrolíticas:** Unidad de producción de soda cáustica y cloro, proceso que se lleva a cabo mediante la electrolisis o descomposición del cloruro de sodio.

**Base:** Base o álcali es una sustancia química que en disolución acuosa aporta iones  $\text{OH}^-$  al medio y cuando reaccionan con los ácidos dan como producto sales y agua.

**Pureza:** Se dice que una sustancia es pura si todas las partículas que la conforman son exactamente iguales, es decir, tienen una composición definida y constante; posee algunas propiedades químicas y físicas que la diferencian de las demás y es imposible obtener otras sustancias a partir de ellas por métodos físicos.

**Salmuera:** Es una solución formada por agua con una concentración alta de sal (NaCl) disuelta.

**Cloro activo:** Es el cloro liberado al acidificar la solución.

**Potencial eléctrico:** Es el trabajo a realizar por unidad de carga para trasladar dicha carga dentro de un campo electrostática desde el punto de referencia hasta el punto considerado.

**Catolito:** Es el electrolito adyacente al cátodo de una célula electrolítica, en este caso es el NaOH + hidrogeno.

**Anolito:** Parte del electrolito situado cerca del ánodo que tiene su composición diferenciada debido a las reacciones que se están produciendo en él, en este caso es la salmuera agotada + cloro.

**Equivalente químico:** También denominado peso equivalente o equivalente gramo es la cantidad de una sustancia que reacciona para que pueda producir 1 mol de producto.

### III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

#### 3.1. Hipótesis

##### Hipótesis General

Si empleamos una celda electrolítica a nivel de laboratorio, entonces será viable la síntesis de hipoclorito sódico, ya que se analizará la concentración de hipoclorito sódico.

##### Hipótesis Específicas

- Si, al combinarse los factores de operación de la celda electrolítica, como son potencial eléctrico, concentración de cloruro sódico y tiempo de electrólisis, entonces se ha obtenido hipoclorito sódico de diferentes concentraciones, puesto que se ha analizado la concentración de hipoclorito sódico.
- Si evaluamos la corriente eléctrica en función del tiempo en las pruebas de la celda electrolítica, entonces se obtendrá el consumo específico de energía que necesita la celda electrolítica para la obtención de hipoclorito de sodio.

##### 3.1.1. Operacionalización de variable

###### ➤ Variables independientes

X=Condiciones operativas del proceso de generación de hipoclorito de sodio

###### ➤ Variables dependientes

Y=Variables de respuesta del proceso de generación de hipoclorito de sodio.

En la tabla 2 se presenta la matriz operacional.

**Tabla 2**

*Operacionalización de las variables.*

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
<b>Variable dependiente</b> Y=Variables de respuesta del proceso de generación de hipoclorito de sodio	Son los resultados medidos dentro de un ensayo que es influenciado por otros factores.	Son las variables de concentración de NaClO y cantidad de energía que se mide en la síntesis de hipoclorito de sodio.	Concentración del producto NaClO  Consumo específico de energía	ppm  Kwh/kg	Titulación  Amperímetro
<b>Variable independiente</b> X=Condiciones operativas del proceso de generación de hipoclorito de sodio.	Son los factores que influyen en el proceso de generación de hipoclorito de sodio.	Son los factores de concentración inicial de salmuera, potencial eléctrico aplicado en la celda electrolítica y el tiempo que transcurre desde que observamos algún cambio hasta darnos cuenta de una respuesta que influyen en la producción de hipoclorito de sodio.	Concentración de alimentación de NaCl  Voltaje  Tiempo de reacción	g/L  Voltio  Minutos	Pesado  Voltímetro  Cronometro

## IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

### 4.1. Diseño de investigación

Esta investigación se destaca porque su naturaleza es de tipo aplicada ya que resuelve problemas por medio del conocimiento científico [36]. Según su enfoque es cuantitativo, debido a que utiliza la recolección de datos con una base en la medición numérica y el análisis estadístico para poder probar la hipótesis [37]. Por el grado de manipulación de las variables es experimental porque determina las mejores condiciones operativas para el proceso de generación de hipoclorito de sodio [37]. Según su alcance de investigación es explicativo debido a que se enfoca en explicar porque ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta, o porque se relacionan dos o más variables [37].

**Tabla 3**

*Factores y niveles de experimentación*

N°	Factores	Unidades	Notación	Niveles	
				Bajo	Alto
1	Concentración inicial de la salmuera	mg/L	$X_1$	80	120
2	Potencial eléctrico	V	$X_2$	6	10
3	Tiempo de reacción	Min	$X_3$	30	60

Se propone un diseño factorial de tres factores a dos niveles (bajo y alto) y dos puntos centrales para cada factor. Los factores evaluados son el potencial eléctrico aplicado (6 y 10 voltios) a la celda electrolítica, concentración del cloruro de sodio (80 y 120 g/L) y tiempo de electrolisis (30 y 60 minutos). Los tres factores operativos y los niveles considerados para cada variable se presentan en la tabla 3.

Las variables que se han mantenido constantes durante el proceso de experimentación son:

- Temperatura: 22 °C (aproximadamente)
- Flujo de recirculación de la solución electrolítica (3 L/ min)
- Volumen de la solución de 1L

En la tabla 4 se muestra la matriz de experimentación, donde se observa que se han ejecutado 10 ensayos, ocho ensayos de acuerdo al diseño factorial y 2 ensayos de puntos centrales (ensayos 9 y10).

**Tabla 4**

*Matriz de experimentación*

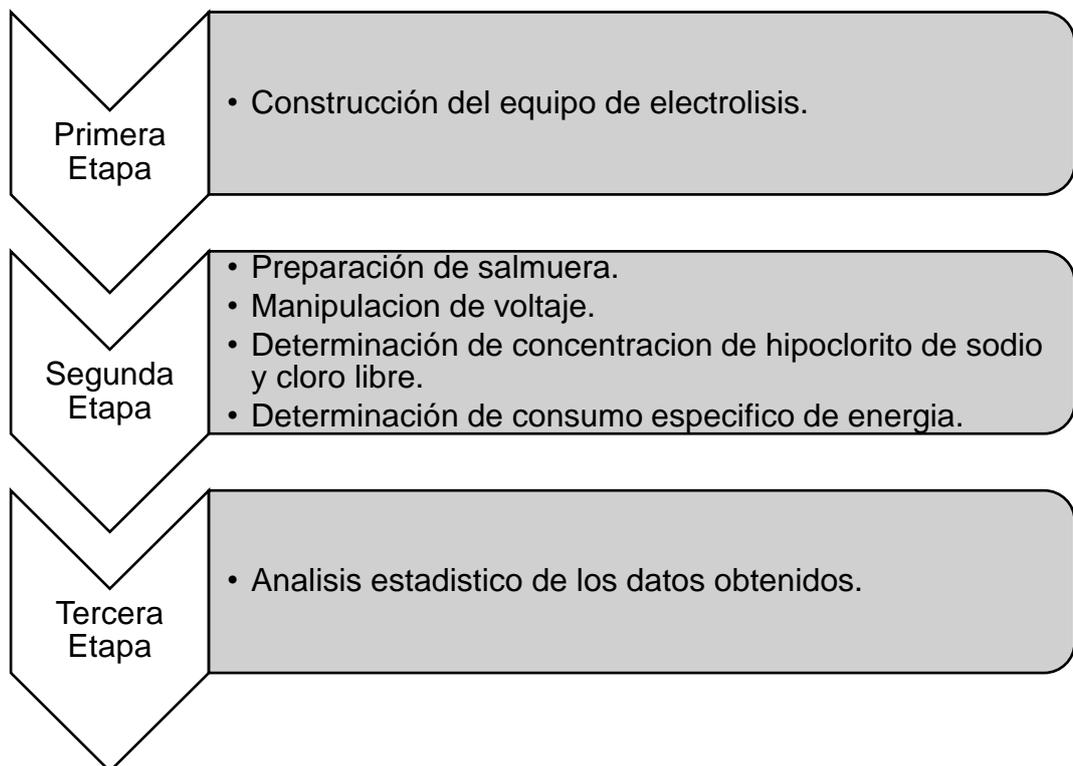
N°	X <sub>1</sub> (g/L)	X <sub>2</sub> (V)	X <sub>3</sub> (min)
1	80	6	30
2	80	10	30
3	120	6	30
4	120	10	30
5	80	6	60
6	80	10	60
7	120	6	60
8	120	10	60
9	100	8	45
10	100	8	45

## 4.2. Método de investigación

Esta investigación se realizó en tres etapas, la primera es la construcción del equipo de electrolisis a escala de laboratorio y las pruebas preliminares de energía, hidráulicas y pruebas de síntesis de hipoclorito de sodio. La segunda etapa es la síntesis de hipoclorito de sodio de acuerdo al diseño experimental propuesto. La tercera etapa fue el análisis estadístico de los datos obtenidos y la redacción del trabajo final de tesis.

**Figura 3**

*Diagrama de etapas del proceso*



La segunda etapa se desarrolló de acuerdo a los siguientes pasos:

✓ **Preparación de salmuera:** Para preparar las soluciones de 80, 100 y 120 g/L de cloruro de sodio, se pesaron 80, 100 y 120 gramos de cloruro de sodio químicamente puro y disueltos en 1 litros de agua desionizada.

✓ **Manipulación del voltaje:** La fuente eléctrica continua tiene botones que pueden aumentar o disminuir el voltaje. Se regula el potencial eléctrico a 6, 8 y 10 voltios y se toma la lectura de la intensidad de corriente eléctrica cada 5.

✓ **Procedimiento de la determinación de la concentración del hipoclorito de sodio y cloro libre:**

1. Medir con una pipeta de 25 mL de la muestra de la solución de hipoclorito de sodio en un frasco de 250 mL. Consigne el peso de la muestra próximo al 0.01 g. Aumente agua desionizada al frasco de 250 mL, marque y mezcle. Esta solución de la muestra será utilizada como solución común para determinar el porcentaje NaOCl. (Observación 1)

2. Con una pipeta tomar una alícuota de 10 mL de la solución común, e introducir en un Erlenmeyer de 250 mL, preliminarmente al Erlenmeyer introducir 50 mL de agua destilada.

3. Adicionar 25 mL de solución de yoduro de potasio al 5%. La solución de la muestra cambiara de claro a un color amarillo intenso.

4. Tomar 10 mL de ácido clorhídrico 1 N y adicionar a la solución que contiene yoduro, debido a que libera yodo se obtiene un cambio de color, a un color marrón ámbar.

5. Colocar la mezcla en un aparato de agitación magnética y remover suavemente.

6. Titular con tiosulfato de sodio 0.1 N hasta que la solución presente una coloración amarillo pálido, teniendo cuidado de no sobre-titular la solución hasta que esté muy clara. (Observación 2)

7. Agregar 5 mL de indicador de almidón y continuar titulado con tiosulfato de sodio 0.1 N hasta que el color azul desaparezca y la solución se torne incolora. Debido a que el indicador almidón reacciona con el yodo se forma un complejo de color azul/purpura muy intenso, que es visible a muy bajas concentraciones de yodo ( $2 \times 10^{-5}$  M).

8. Registrar el volumen gastado (mL) que se utilizó del tiosulfato de sodio 0.1 N. Este volumen será utilizado para calcular el porcentaje de NaOCl en la muestra. (Observación 3)

El contenido de hipoclorito de sodio puede ser calculado como porcentaje de cloro disponible (p/p) o como porcentaje de hipoclorito de sodio (p/p) mediante las siguientes formulas:

$$\%Cl = \frac{(V)(N)(0.03545)(100)}{(10/250)(W)} \quad (14)$$

$$\%NaOCl = \frac{(V)(N)(0.03722)(100)}{(10/250)(W)} \quad (15)$$

Donde:

W = Peso en gramos de la muestra original (g)

V = Volumen en mililitros de la solución de Tiosulfato de Sodio (gasto) de concentración de 0.1 N (mL)

N = Normalidad de la solución de Tiosulfato de Sodio (N)

10/250 = Factor de dilución de la Solución Stock

(Alícuota de 10 mL tomada a partir de la solución común de 250 mL)

0.03723 = Peso miliequivalente de NaOCl

0.03545 = Peso miliequivalente de Cl<sub>2</sub>

$$ppm NaOCl = \%NaOCl * 10000 \% \quad (21)$$

✓ **Determinación del consumo específico de energía**

1. Observar si la intensidad en el equipo vario o es constante y anotar cada 5 minutos como varia y se calcula mediante la fórmula de consumo de energía específico.
2. El consumo específico de energía E (kWh/kg) se calcula mediante la ecuación 20.

$$E \left( \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right) = \frac{E_{\text{cel}} \int_0^t I dt}{C_{\text{NaClO}} V} \quad (20)$$

Donde:

$E$  (kWh/kg): es el consumo de energía

$E_{\text{cel}}$  (V): es la caída de tensión en la pila o el voltaje del equipo de electrolisis.

$I$  (A): es la corriente.

$t$  (min): es el tiempo de cada prueba.

$C_{\text{NaClO}}$  (kg/L): concentración de hipoclorito de sodio en el tiempo.

$V$  (L): es el volumen inicial del cloruro de sodio, igual a 1 L

### **4.3. Población y muestra**

#### **4.3.1. Población**

En el presente trabajo no es aplicable la población.

#### **4.3.2. Muestra**

Para el desarrollo del trabajo experimental se ha preparado soluciones sintéticas usando agua destilada y cloruro de sodio de grado analítico, Las muestra para cada prueba experimental fue de 1000 mL de solución electrolítica, se fijó por la capacidad del equipo experimental.

### **4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado**

El presente proyecto y el análisis de las muestras fueron realizados en las instalaciones del laboratorio de operaciones unitarias y procesos de la Universidad Nacional del Callao, ubicado en Bellavista, provincia del Callao, departamento de Lima. La investigación se desarrolló desde enero del 2019 hasta julio del 2023, teniendo un tiempo de dos años de pare de la investigación debido a la pandemia causada por el virus SARS-CoV-2.

## **4.5. Técnicas e instrumentos de la recolección de información**

### **4.5.1. Técnicas de recolección de datos**

Para la determinación de cloro libre y cloro total se utilizó el método de valoración yodométrica que se encuentra en la norma ISO 7393 y los métodos de prueba estándar de muestreo y análisis químico de cloro que contiene lejía que se encuentra en la norma ASTM D-2022.

### **4.5.2. Instrumentos de recolección de datos**

#### a) Equipos y materiales

Los siguientes equipos fueron usados durante el experimento

✓ Celda electrolítica

- Fuente eléctrica de corriente continua de 5 A y 30 voltios
- Bomba de 200 de capacidad de 200 GPD
- Balanza analítica
- Termómetro
- Agitador magnético

#### b) Materiales:

- Luna de reloj, espátula, bureta, bagueta, pipeta, matraces, vasos de precipitado, probetas y fiolas.

#### c) Reactivos

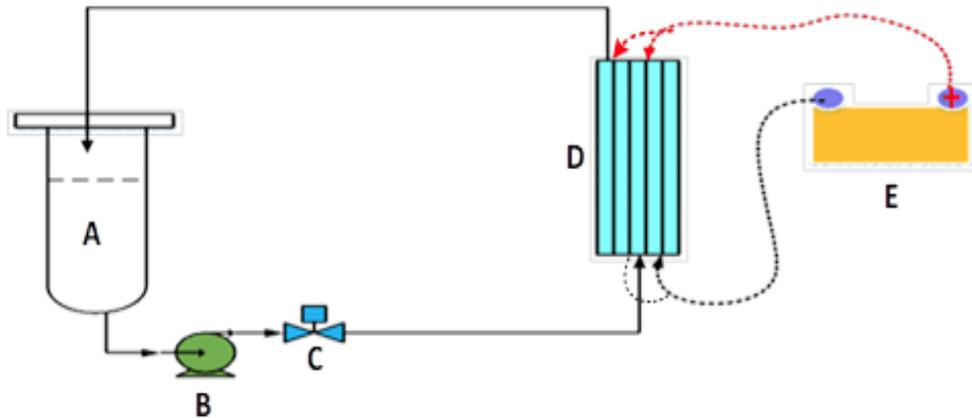
- Agua desmineralizada, cloruro de sodio grado analítico (NaCl)
- Tiosulfato de sodio 0.1 N. peso de 24.8190 gramos de tiosulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) en un frasco volumétrico de 1L.
- Ácido clorhídrico 1.0 N
- Yoduro de potasio 5%. Pese 50 gramos de yoduro de potasio (KI) en un frasco volumétrico de 1L y adicione agua desionizada.
- Almidón 0.5%

## b) Equipo experimental

El esquema utilizado para llevar a cabo los experimentos de este estudio se muestra en la Figura 4. Los experimentos de electrólisis de la solución de cloruro sódico se llevaron a cabo en una célula electrolítica en modo discontinuo, a temperatura ambiente (22°C). Para cada experimento, el recipiente (A) se llenó con 1 L de solución de cloruro sódico de concentraciones 80 g/L, 100 g/L y 120 g/L. El potencial eléctrico aplicado a la célula se ajustó a 6, 8 y 10 V, manteniéndose constante durante cada experimento, mientras que la corriente eléctrica se controla cada 5 minutos de tratamiento. El tiempo de electrólisis fue de 30, 45 y 60 minutos según el diseño experimental propuesto. La corriente eléctrica se suministró mediante una fuente de alimentación regulada de CC (0-5 A, 0-30 V). La solución se hizo circular entre el recipiente de almacenamiento del electrolito y la célula mediante una bomba centrífuga; el caudal se ajustó mediante una válvula de plástico instalada en el tubo de entrada, como se muestra en la figura 4. El caudal de recirculación se mantuvo constante durante todo el experimento en 3 L/min. El sistema de tuberías y la válvula son de material PVC para agua caliente y tienen un diámetro de 0,5 pulgadas. Se tomó una muestra de 10 mL de solución al principio y al final del experimento para analizar el hipoclorito de sodio. Los experimentos se planificaron de acuerdo con el diseño factorial que se muestra en la tabla 4. Los elementos del equipo experimental son los siguientes: (A) recipiente;(B) bomba;(C) válvula de control de caudal;(D) célula electrolítica;(E) fuente de alimentación CC.

**Figura 4**

*Esquema de celda electrolítica*



## 4.6. Análisis y procesamiento de datos

### 4.6.1. Procesamiento de datos

En vista a que el presente trabajo de investigación solo contiene factores cuantitativos es indispensable procesar los datos obtenidos en la experimentación a través de una matriz de datos, tablas y gráficos empleando softwares como Excel, Minitab y Polymath. Para presentar los resultados se utilizó la estadística descriptiva e inferencial.

Debido a esta razón, los datos de esta investigación que se recopilaron a través del método de experimentación son procesados convenientemente para lo cual es necesario tabularlos, medirlos y sintetizarlos.

#### a) Tabulación

Primeramente, vamos a definir los niveles de experimentación para los factores independientes.

**Tabla 5***Factores y niveles de experimentación*

Voltaje (V) $X_2$	Concentración de salmuera (g NaCl/L) $X_1$	Tiempo de reacción (min) $X_3$	T (°C)	$Y_1$ (ppm)	$Y_2$ (kwh)
6 voltios	80	30	25.6	227	205.4837

**Tabla 6***Resultados de la primera experimentación*

N°	FACTORES	NOTACION	NIVEL	NIVEL	NIVEL
			BAJO	MEDIO	ALTO
1	Concentración de alimentación de NaCl (g/L)	$X_1$	80	100	120
2	Voltaje (voltios)	$X_2$	6	8	10
3	Tiempo de reacción (min)	$X_3$	30	45	60

Vamos a tabular mediante cuadros donde se muestre los datos recopilados en la investigación.

**Primera experimentación:**

Concentración inicial de la salmuera ( $X_1$ ) = 80 g/L

Voltaje ( $X_2$ ) = 6 V

Tiempo de reacción ( $X_3$ ) = 30 min

T=Temperatura en grados Celsius de la muestra original del producto

NaClO

Concentración de hipoclorito de sodio (ppm) =  $Y_1$

Consumo específico de energía (kwh) =  $Y_2$

b) Síntesis

En esta parte se presenta ordenadamente y resumidamente los elementos recopilados durante la investigación

En el presente trabajo se usará como diseño experimental el método Taguchi que nos ayuda a identificar los factores que más contribuyen a lograr resultados positivos además se trabaja con una porción pequeña de las posibles combinaciones de factores de entrada.

### **Matriz de diseño Experimental Taguchi $L_9$ ( $3^4$ )**

Concentración de alimentación de la salmuera ( $X_1$ )

Voltaje ( $X_2$ )

Tiempo de reacción ( $X_3$ )

Y: Producto NaClO

**Tabla 7***Cuadro detallado de la experimentación*

N°	X <sub>1</sub> (g/L)	X <sub>2</sub> (V)	X <sub>3</sub> (min)
<b>Experiencias</b>			
1	80	6	30
2	80	10	30
3	120	6	30
4	120	10	30
5	80	6	60
6	80	10	60
7	120	6	60
8	120	10	60
9	100	8	45
10	100	8	45

**4.6.2. Análisis de datos**

Para hallar los resultados y cumplir con los objetivos de esta investigación se planteó el manejo de la Estadística descriptiva e Inferencial. De acuerdo al tipo de factor se consideró el tipo de análisis a seguir.

**Tabla 8**

*Tipo de factores de investigación.*

<b>N°</b>	<b>FACTORES</b>	<b>NOTACION</b>	<b>TIPO DE FACTOR</b>
1	Concentración inicial de la salmuera	$X_1$	Cuantitativo
2	Voltaje	$X_2$	Cuantitativo
3	Tiempo de reacción	$X_3$	Cuantitativo

#### **4.7. Aspectos Éticos en Investigación**

En la presente investigación las autoras se responsabilizan de la información que se emite en el presente informe final. De igual forma hacen de conocimiento que la investigación presente es inédita ya que se han obtenido los datos experimentales en el laboratorio de operaciones unitarias y procesos de la Universidad Nacional del Callao

## V. RESULTADOS

### 5.1 Resultados descriptivos

Para obtener la concentración óptima de hipoclorito de sodio y cloro útil se realizó 10 experiencias por duplicado, mostrando en la tabla 9, 10 y 11 los resultados de las experiencias.

❖ Resultados de la concentración de hipoclorito de sodio

**Tabla 9**

*Concentración de hipoclorito de sodio*

Concentración inicial de salmuera (g NaCl/L) $X_1$	Voltaje (V) $X_2$	Tiempo de reacción (min) $X_3$	Concentración de hipoclorito de sodio (ppm) $Y_1$	Concentración de hipoclorito de sodio (ppm) $Y_1$ (Duplicado)	Concentración de hipoclorito de sodio (ppm) $Y_1$ (Promedio)
80	6	30	227	150	189
80	10	30	1417	1213	1315
120	6	30	229	148	189
120	10	30	1523	1669	1596
80	6	60	98	151	125
80	10	60	1782	1712	1747
120	6	60	525	170	348
120	10	60	2320	2231	2276
100	8	45	331	569	450
100	8	45	683	478	581

❖ Resultados del porcentaje de cloro útil

**Tabla 10**

*Porcentaje de cloro útil*

Concentración inicial de salmuera (g NaCl/L) $X_1$	Voltaje (V) $X_2$	Tiempo de reacción (min) $X_3$	%Cl útil	%Cl útil (Duplicado)	%Cl útil (Promedio)
80	6	30	0.0213%	0.0142%	0.0178%
80	10	30	0.1134%	0.1134%	0.1134%
120	6	30	0.0213%	0.0142%	0.0178%
120	10	30	0.1258%	0.1577%	0.1418%
80	6	60	0.0089%	0.0142%	0.0116%
80	10	60	0.1701%	0.1594%	0.1648%
120	6	60	0.0443%	0.0159%	0.0301%
120	10	60	0.2197%	0.2108%	0.2153%
100	8	45	0.0319%	0.0531%	0.0425%
100	8	45	0.0602%	0.0449%	0.0526%

- ❖ Resultados finales de la concentración de hipoclorito de sodio y porcentaje de cloro útil

**Tabla 11**

*Concentración final de hipoclorito de sodio y porcentaje de cloro útil final*

N°	Concentración inicial de salmuera (g NaCl/L) $X_1$	Voltaje (V) $X_2$	Tiempo de reacción (min) $X_3$	Concentración de hipoclorito de sodio (ppm) $Y_1$ (Promedio)	%Cl útil (Promedio)
1	80	6	30	189	0.0178%
2	80	10	30	1315	0.1134%
3	120	6	30	189	0.0178%
4	120	10	30	1596	0.1418%
5	80	6	60	125	0.0116%
6	80	10	60	1747	0.1648%
7	120	6	60	348	0.0301%
8	120	10	60	2276	0.2153%
9	100	8	45	450	0.0425%
10	100	8	45	581	0.0526%

El consumo de energía depende mucho de la intensidad de la corriente que varía con el tiempo, en la experimentación se tomó el dato de como varia la intensidad cada cinco minutos y se realizó una gráfica intensidad versus tiempo para saber la ecuación de tendencia y reemplazarla en la ecuación de consumo de energía y saber este valor.

En la tabla 12 se muestra los datos de intensidad versus tiempo de la primera experimentación y en la figura 4 se muestra la figura y la ecuación de tendencia de la primera experiencia.

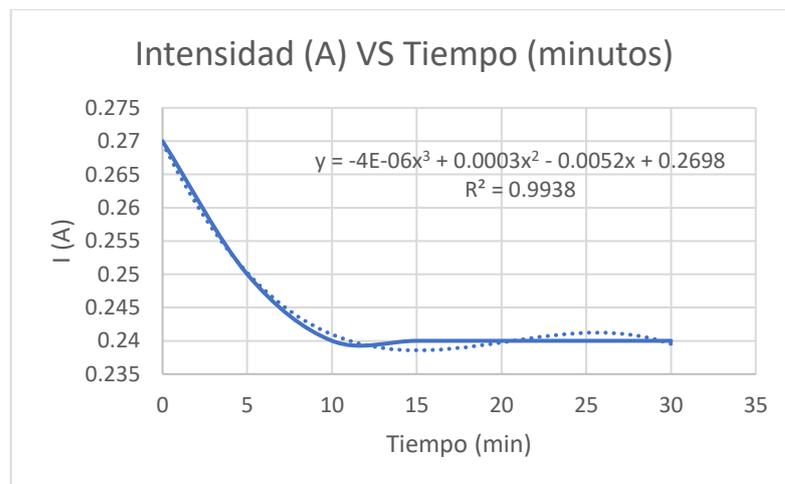
**Tabla 12**

*Variación de la intensidad de corriente con respecto al tiempo*

t (min)	0	5	10	15	20	25	30
V (V)	6	6	6	6	6	6	6
I (A)	0.27	0.25	0.24	0.24	0.24	0.24	0.2

**Figura 5**

*Intensidad versus Tiempo de la primera experimentación*



En los 10 experimentos se realizó esta gráfica y se reemplazó en la ecuación de consumo específico de energía E (kWh/kg) obteniéndose los siguientes resultados que se muestra en la tabla 13.

**Tabla 13***Consumo específico de energía*

N°	Concentración inicial de salmuera (g NaCl/L) $X_1$	Voltaje (V) $X_2$	Tiempo de reacción (min) $X_3$	Consumo específico de energía (kWh/kg) $Y_2$	Consumo específico de energía (kWh/kg) $Y_2$ (Duplicado)	Consumo específico de energía (kWh/kg) $Y_2$ (Promedio)
1	80	6	30	205.4837	350.8056	278.1447
2	80	10	30	632.0818	619.6826	625.8822
3	120	6	30	288.4272	454.7512	371.5892
4	120	10	30	663.7665	776.6791	720.2228
5	80	6	60	1842.5114	3192.3446	2517.428
6	80	10	60	816.5324	912.6882	864.6103
7	120	6	60	194.0297	234.8378	214.4337
8	120	10	60	804.6837	869.2062	836.9449
9	100	8	45	1022.44	671.5806	1173.8498
10	100	8	45	557.6207	799.8807	929.4718

En la tabla 14 se muestra el resumen de los datos de concentración de hipoclorito de sodio y consumo específico de energía.

**Tabla 14***Concentración de hipoclorito de sodio y consumo específico de energía*

N°	Concentración inicial de salmuera (g NaCl/L) $X_1$	Voltaje (V) $X_2$	Tiempo de reacción (min) $X_3$	Concentración de hipoclorito de sodio (ppm) $Y_1$	Consumo específico de energía (kwh/kg) $Y_2$
1	80	6	30	189	278.1447
2	80	10	30	1315	625.8822
3	120	6	30	188	371.5892
4	120	10	30	1596	720.2228
5	80	6	60	125	2517.428
6	80	10	60	1747	864.6103
7	120	6	60	348	214.4337
8	120	10	60	2276	836.9449
9	100	8	45	450	1173.8498
10	100	8	45	581	929.4718

## 5.2 Resultados inferenciales

Se evaluaron los valores de cada muestra y de sus repeticiones mediante el software Minitab 19 mediante el método factorial, para comparar las medidas de los diversos grupos de datos.

**Tabla 15***Información de factores*

<b>FACTORES</b>	<b>NIVELES</b>	<b>TIPO DE VARIABLE</b>
X <sub>1</sub> =Concentración inicial de la salmuera (g NaCl/L)	3	80; 100; 120
X <sub>2</sub> =Voltaje (V)	3	6; 8; 10
X <sub>3</sub> =Tiempo de reacción (min)	3	30; 45; 60

- Resultados de la concentración de hipoclorito de sodio

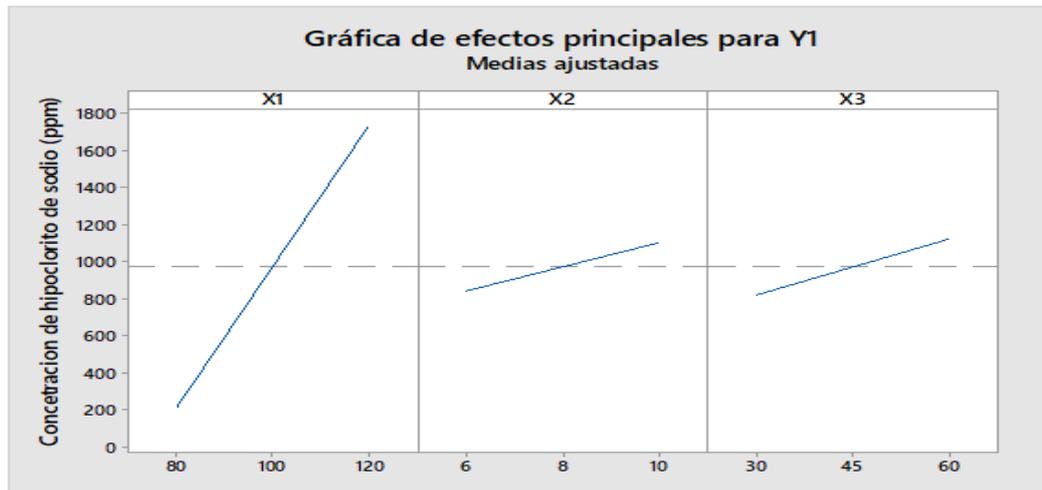
La concentración de hipoclorito de sodio tiene una relación directa con tres factores independientes como se muestra en la figura 6.

**Tabla 16***Concentración promedio de hipoclorito de sodio*

<b>N°</b>	<b>Concentración inicial de salmuera (g NaCl/L) X<sub>1</sub></b>	<b>Voltaje (V) X<sub>2</sub></b>	<b>Tiempo de reacción (min) X<sub>3</sub></b>	<b>Concentración de hipoclorito de sodio (ppm) Y<sub>1</sub> (Promedio)</b>
1	80	6	30	189
2	80	10	30	1315
3	120	6	30	189
4	120	10	30	1596
5	80	6	60	125
6	80	10	60	1747
7	120	6	60	348
8	120	10	60	2276
9	100	8	45	450
10	100	8	45	581

**Figura 6**

*Gráfica de efectos principales para concentración de NaClO*



- Resultados del consumo específico de energía

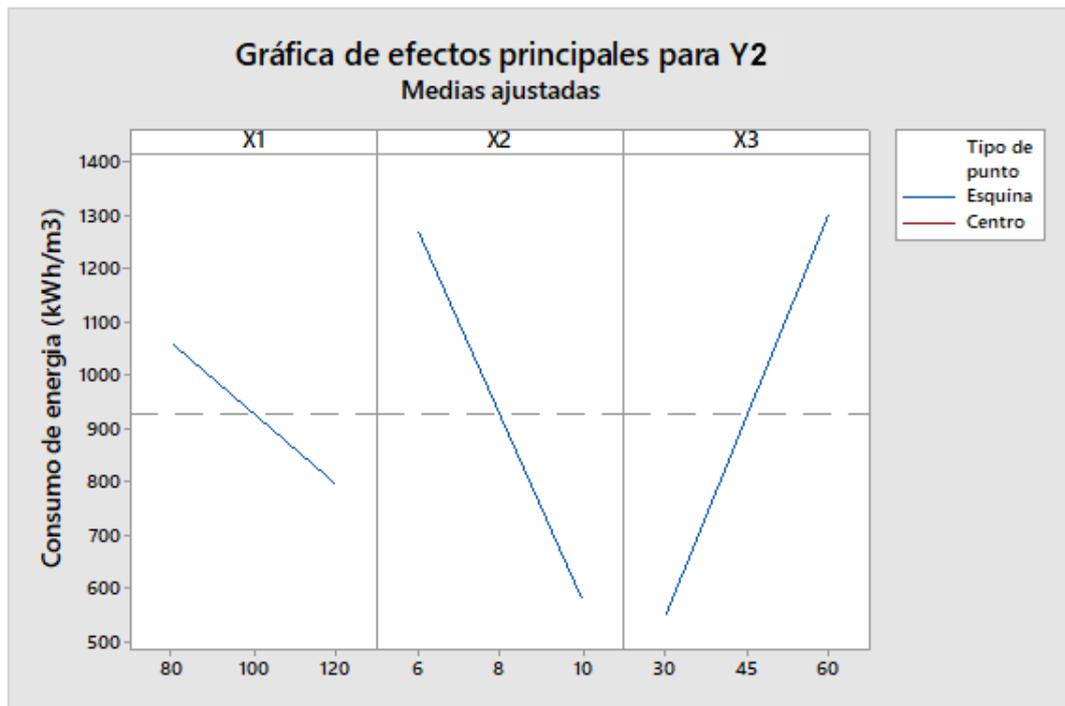
El consumo específico de energía E (kWh/kg) se muestra en la tabla 17 y se observa en la figura 7 una relación inversa del consumo de energía con los factores concentración de alimentación de NaCl ( $X_1$ ) y voltaje ( $X_2$ ), al mismo tiempo que se muestra una relación directa con el factor tiempo ( $X_3$ ).

**Tabla 17***Consumo específico de energía*

<b>N°</b>	<b>Concentración inicial de salmuera (g NaCl/L) <math>X_1</math></b>	<b>Voltaje (V) <math>X_2</math></b>	<b>Tiempo de reacción (min) <math>X_3</math></b>	<b>Consumo específico de energía (kWh/kg) <math>Y_2</math> (Promedio)</b>
1	80	6	30	278.1447
2	80	10	30	625.8822
3	120	6	30	371.5892
4	120	10	30	720.2228
5	80	6	60	2517.428
6	80	10	60	864.6103
7	120	6	60	214.4337
8	120	10	60	836.9449
9	100	8	45	1173.8498
10	100	8	45	929.4718

**Figura 7**

*Gráfica de efectos principales para consumo específico de energía*



Al analizar los resultados se llega a inferir que cada uno de los factores (concentración de alimentación de NaCl, voltaje y tiempo de reacción) tiene un impacto en la producción de hipoclorito de sodio pero que al analizar las variables de respuesta (concentración de hipoclorito de sodio u consumo específico de energía) el factor concentración inicial de salmuera y voltaje tienen un efecto más significativo.

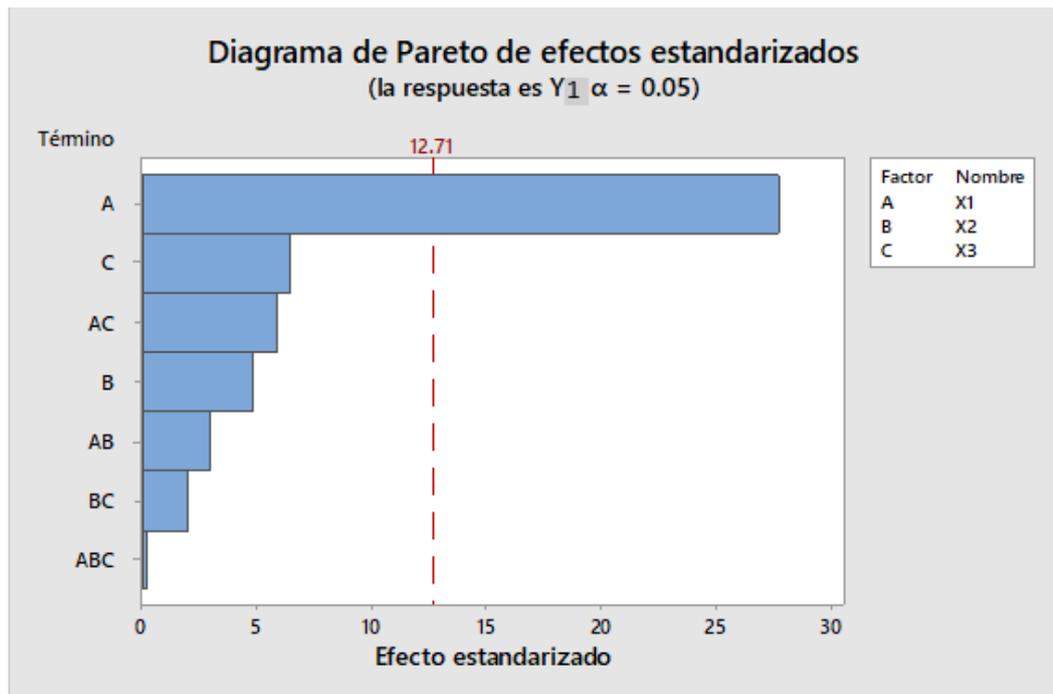
**Tabla 18***Concentración de hipoclorito de sodio y consumo específico de energía*

N°	Concentración inicial de salmuera (g NaCl/L) X <sub>1</sub>	Voltaje (V) X <sub>2</sub>	Tiempo de reacción (min) X <sub>3</sub>	Concentración de hipoclorito de sodio (ppm) Y <sub>1</sub> (Promedio)	Consumo específico de energía (kwh/kg) Y <sub>2</sub> (Promedio)
1	80	6	30	189	278.1447
2	80	10	30	1315	625.8822
3	120	6	30	188	371.5892
4	120	10	30	1596	720.2228
5	80	6	60	125	2517.428
6	80	10	60	1747	864.6103
7	120	6	60	348	214.4337
8	120	10	60	2276	836.9449
9	100	8	45	450	1173.8498
10	100	8	45	581	929.4718

En el diagrama de Pareto de efectos estandarizados se observa que el factor concentración inicial de salmuera tiene el mayor grado de influencia en la variable respuesta concentración de hipoclorito de sodio a diferencia de los factores voltaje y tiempo de reacción. La interacción de estos factores también tiene influencia en la concentración de hipoclorito de sodio (se aprecia notoriamente en la figura 8).

**Figura 8**

*Diagrama de parteo de efectos estandarizados en concentración de NaClO*



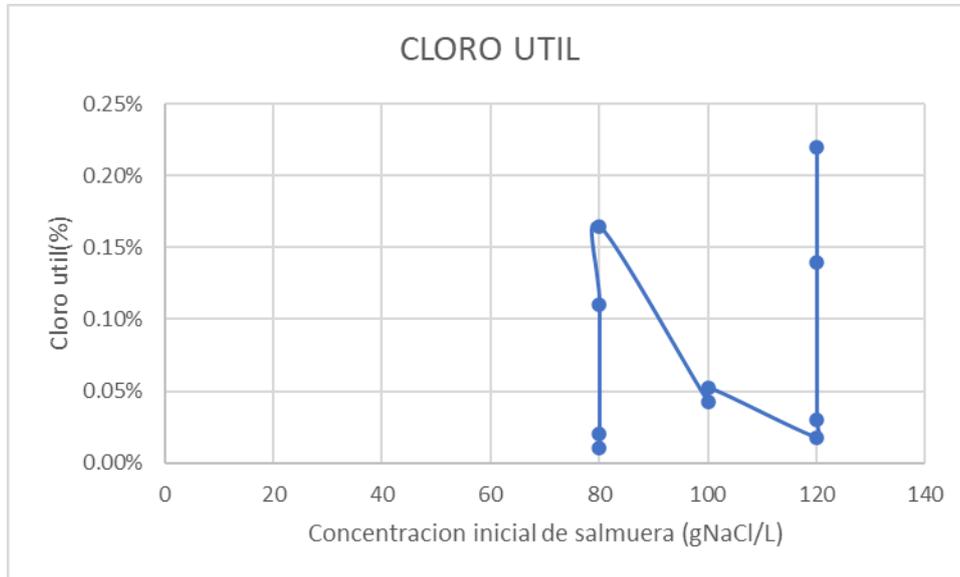
### 5.3 Otros resultados estadísticos

#### 5.3.1 Efecto de la concentración inicial de la salmuera

La producción de cloro activo en la celda de electrolisis tiene una relación directa con la concentración de hipoclorito de sodio disuelto en agua, donde a mayores concentraciones de cloruro de sodio en el electrolito la celda de electrolisis tiene mayor producción de cloro activo.

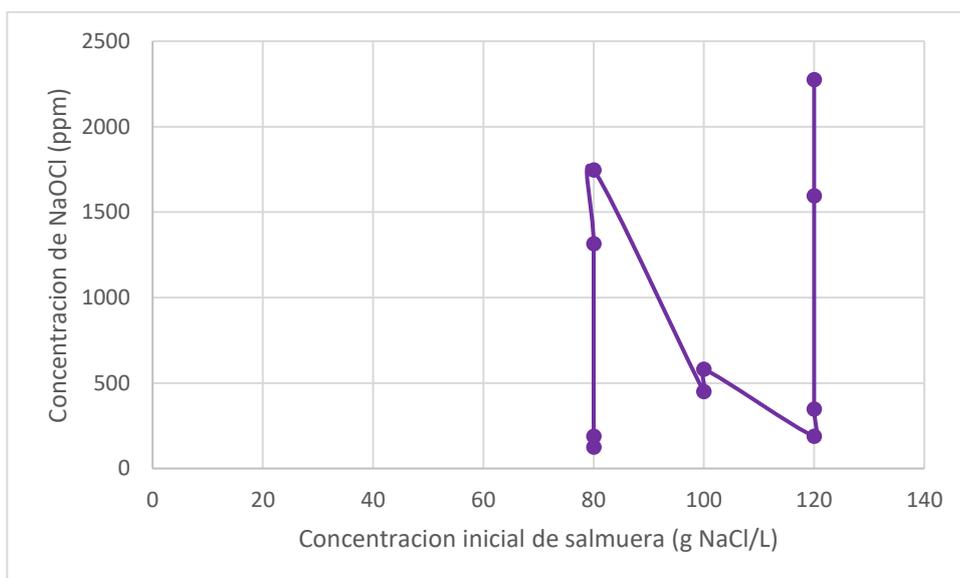
**Figura 9**

*Efecto de la concentración inicial de la salmuera en el cloro útil*



**Figura 10**

*Efecto de la concentración inicial de la salmuera en el hipoclorito de sodio*



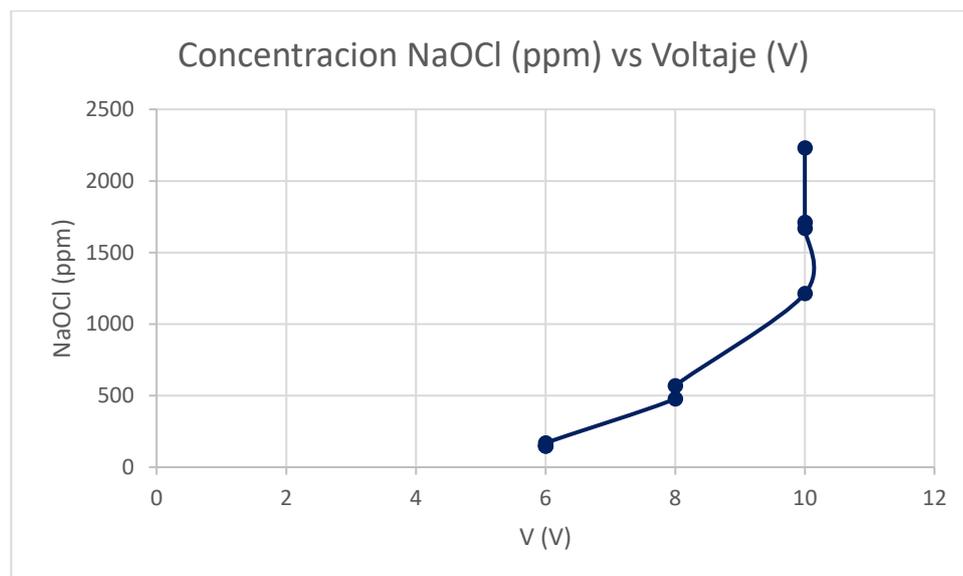
Se puede evidenciar que, a concentraciones altas de sal, superiores a los 100 g NaCl/L, se presenta un comportamiento asintótico en la producción de hipoclorito de sodio, por lo que hay un límite en la concentración de cloro activo que se encuentra en la celda.

### 5.3.2 Efecto de la intensidad de corriente de electrolisis

La intensidad de corriente por unidad de área que se aplica a los electrodos tiene una relación directamente proporcional con la producción de cloro activo y la concentración de hipoclorito de sodio, lo que se explica por medio de la primera ley de Faraday, en donde se afirma que el peso de una sustancia depositada es proporcional a la corriente, por lo que se infiere que a mayores valores de intensidad de corriente que se depositan en el ánodo, se dará una mayor acumulación de iones cloruro en la interfase del electrodo que pueden ser oxidados.

**Figura 11**

*Efecto de la intensidad de corriente de electrolisis en el hipoclorito de sodio*

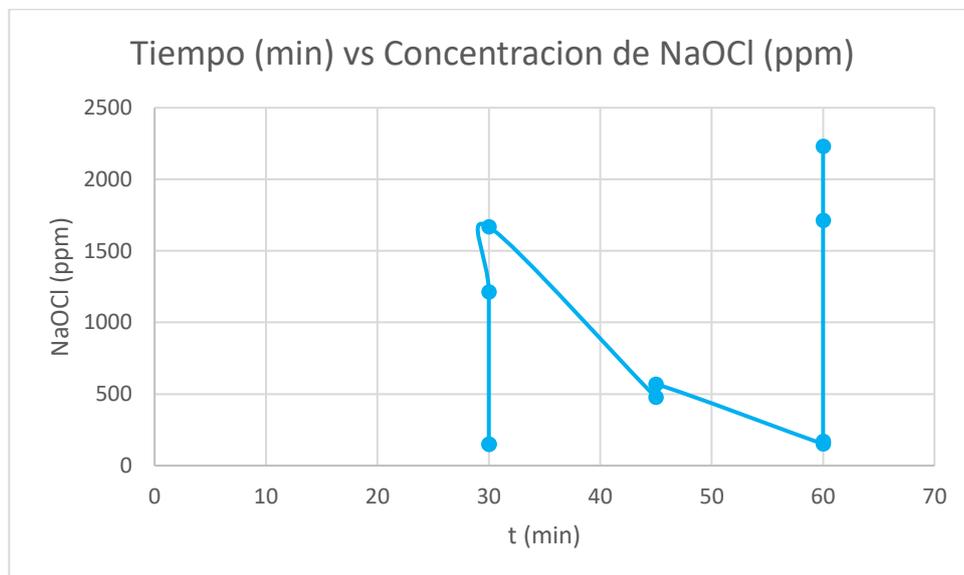


### 5.3.3 Efecto del tiempo de electrolisis

De los resultados obtenidos se encuentra que la mayor eficiencia de hipoclorito de sodio se alcanza aumentando el tiempo hasta 30 y 45 minutos para Pb/PbO<sub>2</sub> y electrodos C/PbO<sub>2</sub> por eso se tomó 30 minutos como tiempo optimo.

**Figura 12**

*Efecto del tiempo de electrolisis en el hipoclorito de sodio*



## VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

Primero realizaremos el análisis para poder validar que los datos que se han obtenido en las corridas experimentales presentan distribución normal.

**Tabla 16**

*Concentración de hipoclorito de sodio, grado de conversión de NaCl y consumo específico de energía*

N°	Concentración inicial de salmuera NaCl/L) $X_1$	Voltaje de (V) $X_2$	Tiempo de reacción (min) $X_3$	Concentración de hipoclorito de sodio (ppm) $Y_1$	Consumo específico de energía (kwh/kg) $Y_2$
1	80	6	30	189	278.1447
2	80	10	30	1315	625.8822
3	120	6	30	188	371.5892
4	120	10	30	1596	720.2228
5	80	6	60	125	2517.428
6	80	10	60	1747	864.6103
7	120	6	60	348	214.4337
8	120	10	60	2276	836.9449
9	100	8	45	450	1173.8498
10	100	8	45	581	929.4718

Según la hipótesis específica 1 si será viable la síntesis de hipoclorito de sodio si empleamos una celda electrolítica a nivel laboratorio ya que en la parte experimental se obtuvieron valores mayores de concentración de hipoclorito de sodio cuando las concentraciones iniciales de la salmuera eran 80 y 120 g NaCl/L.

Según la hipótesis específica 2 al combinarse los factores de operación de celda electrolítica, como son potencial eléctrico, concentración de cloruro de sodio y tiempo de electrolisis, se ha obtenido hipoclorito de sodio de diferentes concentraciones y en la parte experimental se obtuvieron diferentes valores de concentración de hipoclorito de sodio al combinar diferentes valores de los factores de operación pero la mayor concentración de hipoclorito se obtuvo cuando la concentración de cloruro de sodio era de 120 g de NaCl/L, el tiempo de reacción era 60 minutos y también cuando el voltaje era 10 V.

Según la hipótesis específica 3 al evaluar la corriente eléctrica en función del tiempo en las pruebas de la celda electrolítica, entonces se obtendrá el consumo específico de energía, en la parte experimental se notó una variación de la intensidad con respecto al tiempo y se obtuvo un mayor consumo de energía a los 60 minutos con un voltaje de 6 V.

## **6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares**

En [23] se realizó la generación de hipoclorito en algunos electrodos modificados para el tratamiento de contaminantes de aguas residuales, obteniendo que la mayor producción de hipoclorito de sodio se dio a una concentración óptima de salmuera de 20 g NaCl/L a un pH 12 y

temperatura de 100 °C, y que un aumento adicional de la concentración de salmuera no tiene efecto sobre la generación de hipoclorito de sodio. Sin embargo, en la presente investigación la mayor concentración de hipoclorito de sodio se obtuvo cuando la concentración óptima de la salmuera era 120 g NaCl/L, el voltaje de 10 V y a el tiempo de reacción de 60 minutos. Por lo que podemos concluir que para obtener una mayor concentración de hipoclorito de sodio la concentración inicial óptima de la salmuera también depende de otros factores como el tiempo de reacción, el voltaje, pH, la temperatura, tiempo de descomposición entre otros factores.

En [11] realizaron la obtención de un agente desinfectante a partir de la electrolisis de cloruro de sodio para el tratamiento de agua potable obteniendo que la máxima concentración de cloro libre fue de 3,871 g/L (3871 ppm) para una intensidad de corriente constante de 4,84 A, a una concentración inicial de salmuera de 27 g NaCl/L en un tiempo de reacción de 20 minutos y después empieza a disminuir considerablemente la concentración de cloro libre a mayor tiempo de reacción, también se obtuvo que durante la electrolisis el consumo de cloruro de sodio equivale al 21,2% del total de sal inicial presente en el electrolito. Ellos emplearon una tecnología similar a la de la presente investigación, pero donde la concentración de hipoclorito de sodio también depende de la temperatura y a una intensidad de corriente constante por lo que los valores de concentración de hipoclorito de sodio son aproximados.

En [16] realizaron el estudio de la obtención electrolítica "IN SITU" de disoluciones acuosas de hipoclorito de sodio obteniendo el mejor resultado de porcentaje de cloro activo de 0.7134% que se da cuando los tres factores estudiados (concentración inicial de NaCl, tiempo de reacción e intensidad) tienden al nivel superior (100 g/L de cloruro de sodio, 6 h, 7A). La presente investigación también tuvo los mejores

resultados cuando los tres factores estudiados de la presente investigación (g NaCl/L, tiempo de reacción, voltaje) tienden a nivel superior (120 g NaCl/L, 60 minutos y 10 V) a diferencia de este estudio en la presente investigación no se tomó al factor voltaje como constante debido a que la intensidad presentaba algunas variaciones.

### **6.3 Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes**

De acuerdo al Reglamento del Código de Ética de la investigación de la UNAC, Resolución de Consejo Universitario N° 260-2018-CU las autoras de la investigación se hacen responsables de la información emitida en el presente informe final.

## VII. CONCLUSIONES

1. Al analizar las diferentes concentraciones de hipoclorito de sodio que se obtuvieron en la parte experimental se concluyó que si será viable la síntesis de hipoclorito de sodio empleando una celda electrolítica a nivel de laboratorio.
2. Se llegó a la conclusión de que al combinarse los factores de operación de la celda electrolítica, como son el potencial eléctrico, concentración de cloruro sódico y tiempo de electrolisis se ha obtenido hipoclorito de sodio de diferentes concentraciones, y la mayor concentración que se obtuvo de hipoclorito de sodio a nivel laboratorio fue de 2276 ppm, encontrándose que las condiciones óptimas para llevar a cabo el proceso son una concentración inicial de cloruro sódico de 120 g NaCl/L, un voltaje de 10 V y un tiempo de reacción de 60 minutos.
3. Se comprobó que la corriente eléctrica varía en función del tiempo en las pruebas de celda electrolítica, lo cual nos permite obtener el consumo específico de energía que necesita la celda electrolítica para la síntesis de hipoclorito de sodio siendo 2517.428 kWh/kg el mayor consumo de energía.

## VIII. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda tener el siguiente orden de los parámetros de importancia en el proceso de obtención de hipoclorito de sodio mediante electrolisis: Voltaje>Concentración inicial de salmuera>Tiempo de reacción.
2. Se debe extender el estudio de la tecnología de electrólisis con celda de membrana para la obtención de otros productos como por ejemplo el ácido salicílico ya que presenta un bajo consumo de energía
3. Se sugiere realizar el estudio tomando como factores de operación la relación de área superficial, distancia entre electrodos, pH y temperatura.
4. Se recomienda realizar un estudio del porcentaje de pureza de la materia prima salmuera ya que debe ser de la más alta pureza para la obtención de hipoclorito sodio.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ARIAS ALTAMIRANO, M. *Proyecto de instalación de una microempresa de elaboración de hipoclorito de sodio* [en línea]. Tesis para optar al título de ingeniero químico industrial. Instituto Politécnico Nacional, México: Ciudad de México, 2017. [Consultado 10 de enero del 2019]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/457601181/Tesis-Proyecto-de-instalacion-de-una-microempresa-de-elaboracion-de-hipoclorito-de-sodio-pdf>
- [2] BRAVO PICON, E. A. *Evaluación tecnológica de los procesos de purificación de soda cáustica* [en línea]. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico. Universidad Nacional de Ingeniería, Perú: Lima, 2010. [Consultado 10 de enero del 2019]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.14076/9745>
- [3] CAICEDO ROSERO, L. C. *Diseño de celda electrolítica para análisis electroquímicos* [en línea]. Tesis para optar el título profesional de maestro. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Orizaba, México: Orizaba, 2021. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en: <http://repositorios.orizaba.tecnm.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/452/TESIS%20DISE%c3%91O%20DE%20CELDA%20ELECTROL%c3%8dTICA%20PARA%20AN%c3%81LISIS%20ELECTROQU%c3%8dMICOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [4] CHANG, R. *Química* [en línea]. Editorial McGraw-Hill Interamericana. Colombia: D'vinni Ltda, 2002 [2007]. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en: <https://sacaba.gob.bo/images/wsacaba/pdf/libros/quimica/Chang-QuimicaGeneral7thedicion.pdf>

- [5] DOMGA, DOMGA, R., BERTRAND NAUMI, G., & BOSCO TCHATCHUENG, J. Study of some electrolysis parameters for chlorine and hydrogen production using a new membrane electrolyzer. *International Journal of Chemical Engineering and Analytical Science* [en línea]. 2017, 2(1). 1 – 8. [Consultado 25 de abril del 2019]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/363366580\\_Study\\_of\\_Some\\_Electrolysis\\_Parameters\\_for\\_Chlorine\\_and\\_Hydrogen\\_Production\\_Using\\_a\\_New\\_Membrane\\_Electrolyzer](https://www.researchgate.net/publication/363366580_Study_of_Some_Electrolysis_Parameters_for_Chlorine_and_Hydrogen_Production_Using_a_New_Membrane_Electrolyzer)
- [6] ESPINOZA ORIHUELA, M. *Química en las celdas electrolíticas para la producción de hipoclorito de sodio* [en línea]. Tesis para optar el título de licenciado en química, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú: Lima, 2007. [Consultado 10 de enero del 2019]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.14076/4093>
- [7] FLORES ASCENCIO, L. A. *Control de calidad y proceso en la producción de una planta industrial de cloro soda* [en línea]. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú: Lima, 2007. [Consultado 10 de enero del 2019]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.14076/8794>
- [8] GUIJARRO GÓNGORA, S. Y. *Inhibición de Enterococcus faecalis: Análisis in vitro del efecto antimicrobiano del hipoclorito de sodio a diferentes temperaturas, solo y combinado con agitación* [en línea]. Tesis para optar al título de odontóloga. Universidad Central de Ecuador, Ecuador: Quito, 2017. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/10507>
- [9] GONZALEZ RODRIGUEZ, D. M., & MARTINEZ JARAMILLO, L. M. *Síntesis y caracterización de una membrana de intercambio aniónico con aplicación en celdas de combustible alcalinas* [en línea]. Tesis para optar al título de ingeniero químico, Universidad Nacional de Colombia, Colombia: Medellín, 2009. [Consultado 10 de enero del

2019]. Disponible en:  
[https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/2589/1037576743\\_1036604401\\_2009.pdf?sequence=1](https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/2589/1037576743_1036604401_2009.pdf?sequence=1)

- [10] HEREDIA, A. S. Experiencias divertidas de electroquímica casera. *Revista Eureka* [en línea]. 2007, 4 (3). 506 – 525. [Consultado 10 de enero del 2019]. Disponible en:  
<https://www.redalyc.org/pdf/920/92040309.pdf>
- [11] HERNÁNDEZ SALAMANCA, A. C., & TAFUR LOGREIRA, J. S. *Obtención de un agente desinfectante a partir de la electrolisis de cloruro de sodio para el tratamiento de agua potable* [en línea]. Tesis para optar al título de ingeniero químico, Universidad de América, Colombia: Bogotá D. C., 2018. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en:  
<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6717/1/6131990-2018-1-IQ.pdf>
- [12] JALALI, A. A., MOHAMMADI, F., & ASHRAFIZADEH, S. N. Effects of process conditions on cell voltage, current efficiency and voltage balance of a chlor-alkali membrane cell. *Desalination* [en línea]. 2009, 237(1), 126 – 139. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916408006772>
- [13] KIM K., Seong, MIN SHIN, Dong & WON RHIM, Ji. Designing a high-efficiency hypochlorite ion generation system by combining cation exchange membrane aided electrolysis with chlorine gas recovery stream. *Journal of Membrane Science* [en línea]. 2021, 630, 1 – 10. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376738821002672>

- [14] LEÓN BELTRÁN, R. R. *Modelado y simulación de corrosión y distribución de la densidad de corriente en una celda de membrana y como afecta al catalizador* [en línea]. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú: Arequipa, 2015. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3985>
- [15] LEÓN MOLINA, J. & ABAD CORPA, E. Desinfectantes y antisépticos frente al coronavirus: Síntesis de evidencias y recomendaciones. *Elsevier Enfermería Clínica* [en línea]. 2021, 31, 84 – 88. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7241393/>
- [16] LÓPEZ CAMPISTROUS, L., MONIER GARCÍA, F., & LABRADA VÁZQUEZ, B. Estudio de la obtención electrolítica “In Situ” de disoluciones acuosas de hipoclorito de sodio. *Tecnología Química* [en línea]. 2005, 25(2), 39 – 45. [Consultado 25 de abril del 2019]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543747006.pdf>
- [17] MARCÓ GRATACÓS, J. Generadores de cloro por electrolisis de salmuera con tecnología de célula con membrana. *Tecnoagua* [en línea]. 2014, 108 – 114. [Consultado 25 de abril del 2019]. Disponible en: [https://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua\\_documento/procesos-y-sistemas-generadores-cloro-electrolisis-salmuera-tecnoagua-es.pdf](https://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_documento/procesos-y-sistemas-generadores-cloro-electrolisis-salmuera-tecnoagua-es.pdf)
- [18] MARTÍNEZ ABREU, J. Las enfermedades infecciosas emergentes y reemergentes, un tema de interés para todos. *Rev Méd Electron* [en línea]. 2014, 36(5), 537 – 539. [Consultado 25 de abril del 2019]. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1684-18242014000500001](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1684-18242014000500001)

- [19] MEDINA COLLANA, J. T. *Parámetros físicos y evaluación experimental de modelo difusional* [en línea]. Tesis para optar el grado académico de maestro, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú: Lima, 2009. [Consultado 25 de abril del 2019]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.14076/1066>
- [20] MEDINA COLLANA, J. T. *Influencia de parámetros operacionales en la concentración de ácido y base producido a partir de salmuera procedente de osmosis inversa vía electrodiálisis bipolar* [en línea]. Tesis para optar el título de doctorado, Universidad Nacional Federico Villareal, Perú: Lima, 2017. [Consultado 25 de abril del 2019]. Disponible en: <https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/1668?show=full>
- [21] MEDINA COLLANA, J. T. y otros. Factors Influencing the Formation of Salicylic Acid by Bipolar Membranes Electrodialysis. *Membranes* 2022 [en línea]. 2022, 149(12), 1 – 15. [Consultado 12 de junio del 2023]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2077-0375/12/2/149>
- [22] NIYAZI A. S., AL-AREQI y otros. Effects of cathode materials and electrode separation on electrochemical on-site production of sodium hypochlorite using single batch reactor. *International Journal of Scientific & Engineering Research* [en línea]. 2021, 12(4), 129 – 133. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/351352046\\_Effects\\_of\\_Cathode\\_Materials\\_and\\_Electrode\\_Separation\\_on\\_Electrochemical\\_On-Site\\_Production\\_of\\_Sodium\\_Hypochlorite\\_Using\\_Single\\_Batch\\_Reactor](https://www.researchgate.net/publication/351352046_Effects_of_Cathode_Materials_and_Electrode_Separation_on_Electrochemical_On-Site_Production_of_Sodium_Hypochlorite_Using_Single_Batch_Reactor)
- [23] RAHMAN, M. A. *Hypochlorite generation on some modified electrodes for treatment of wastewater pollutants* [en línea]. Tesis para optar el grado de maestro en ciencias químicas, Universidad Al-Azhar de Gaza, Gaza: Gaza, 2010. [Consultado 25 de abril del 2019].

Disponible en:  
<https://scholar.google.es/citations?user=KBEEeXOoAAAAJ&hl=es&scioq=Hypochorite+generation+on+some+modified+electrodes+for+treatment+of+wastewater+pollutants+&oi=sra>

- [24] REYES CORDERO, R. *Análisis y determinación de los parámetros críticos de la sección de electrolisis en la nueva planta cloro-sosa* [en línea]. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico, Universidad Central Marta Abreu de Villas, Cuba: Villa Clara, 2019. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en: <https://dspace.uclv.edu.cu/items/d932c36e-8af3-47c6-bcd8-ab2b2ad2eb55>
- [25] RODRÍGUEZ ALZAMORA, R. J. *Fundamentos de química general: Disoluciones, propiedades coligativas y gases ideales* [en línea]. Editorial UPSE. Ecuador: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2017. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/600150653/Fundamentos-de-Quimica-General-Disoluciones-Propiedades-Coligativas-y-Gases-Ideales>
- [26] ROMERO, M. Tratamientos utilizados en potabilización de agua. *Boletín Electrónico de la Universidad Rafael Landívar* [en línea]. 2008,8. 1 – 12. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en: [https://fgsalazar.net/LANDIVAR/ING-PRIMERO/boletin08/URL\\_08\\_ING02.pdf](https://fgsalazar.net/LANDIVAR/ING-PRIMERO/boletin08/URL_08_ING02.pdf)
- [27] RONDOY Moran, F. L. *Estudio para la obtención de hidróxido de sodio a partir de yacimiento de salmuera Bayovar-Sechura* [en línea]. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico, Universidad Nacional de Piura, Perú: Piura, 2021. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en: <http://repositorio.unp.edu.pe/handle/20.500.12676/2813>

- [28] ROSALES HUAMANI, J. A. y otros. Factors Influencing the Formation of Sodium Hydroxide by an Ion Exchange Membrane Cell. *Batteries 2021* [en línea]. 2022, 7(2). 3– 11. [Consultado 12 de junio del 2023]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2313-0105/7/2/34>
- [29] SIMON, A., FUJIOKA, T., PRICE, W. E., & NGHIEM, L. D. Sodium hydroxide production from sodium carbonate and bicarbonate solutions using membrane electrolysis: A feasibility study. *Separation and Purification Technology* [en línea]. 2014, 127, 70 – 76. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/260912644\\_Sodium\\_hydroxide\\_production\\_from\\_sodium\\_carbonate\\_and\\_bicarbonate\\_solutions\\_using\\_membrane\\_electrolysis\\_A\\_feasibility\\_study](https://www.researchgate.net/publication/260912644_Sodium_hydroxide_production_from_sodium_carbonate_and_bicarbonate_solutions_using_membrane_electrolysis_A_feasibility_study)
- [30] SOLEDISPA PISCO, J. G. *Análisis de los aspectos ambientales y posibles impactos ambientales aplicando metodología de Leopold en el proceso químico de obtención: Cloro gas, hipoclorito de sodio, soda cáustica y ácido clorhídrico* [en línea]. Tesis de maestría, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador: Guayaquil, 2015. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en: [https://rraae.cedia.edu.ec/Record/ESPOL\\_eae8271b8edc17e13c904977546a3fb9](https://rraae.cedia.edu.ec/Record/ESPOL_eae8271b8edc17e13c904977546a3fb9)
- [31] TANARO, J. D. y otros (2019). Lavado y desinfección con hipoclorito de sodio de lechuga contaminada con Escherichia coli O157:H7. *Ciencia, Docencia y Tecnología* [en línea]. 2019, 9(9), 247. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en: <https://pcient.uner.edu.ar/index.php/Scdyt/article/view/663>
- [32] TOMATIS CHIAPPE, P. E., & ERNST ASTORGA, R. H. *Instalación de una planta de cloro – soda caustica de Bayóvar* [en línea]. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú: Lima, 1978. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.14076/8794>

- [33] VARILLAS BARRETO, J. A. *Desarrollo tecnológico en la industria cloro – soda* [en línea]. Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú: Lima, Perú, 2003. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.14076/8346>
- [34] YARIME, M. *From End-of-Pipe technology to clean technology: effects of environmental regulation on technological change in the chlor-alkali industry in Japan and Western Europe* [en línea]. Tesis para optar el grado de doctor, Universidad de Maastricht, Países Bajos: Maastricht, 2003. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/239809108\\_From\\_End-of-Pipe\\_Technology\\_to\\_Clean\\_Technology\\_Environmental\\_Policy\\_and\\_Technological\\_Change\\_in\\_the\\_Chlor-Alkali\\_Industry\\_in\\_Japan\\_and\\_Europe](https://www.researchgate.net/publication/239809108_From_End-of-Pipe_Technology_to_Clean_Technology_Environmental_Policy_and_Technological_Change_in_the_Chlor-Alkali_Industry_in_Japan_and_Europe)
- [35] MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TEMPORAL Y EL CONSEJO COLOMBIANO DE SEGURIDAD. *Guías de Manejo Seguro y Gestión Ambiental para 25 Sustancias Químicas* [en línea]. Editorial Ultracolor Ltda. Colombia, 2003. [Consultado 22 de abril del 2022]. Disponible en: [https://oab.ambientebogota.gov.co/?post\\_type=dlm\\_download&p=4094](https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=4094)
- [36] EL PERUANO. *Ley N° 30806. Ley que modifica diversos artículos de la ley 28303, Ley marco de ciencia, tecnología e innovación tecnológica; y de la ley 28613, Ley del consejo nacional de ciencia, tecnología e innovación tecnológica* [en línea]. Editorial CONCYTEC. Perú, 2022. [Consultado 12 de junio del 2023]. Disponible en: <https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/1666491-1>
- [37] HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto, FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA LUCIO, Pilar. *Metodología de la Investigación* [en

línea]. Interamericana Editores. México, 2014. [Consultado 12 de junio del 2023]. Disponible en: <https://187.191.86.244/rceis/registro/Metodolog%C3%ADa%20de%20la%20Investigaci%C3%B3n%20SAMPIERI.pdf>

# ANEXOS

## ANEXO 1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

### SÍNTESIS DE HIPOCLORITO DE SODIO A NIVEL DE LABORATORIO MEDIANTE ELECTROLISIS CON CELDA DE MEMBRANA

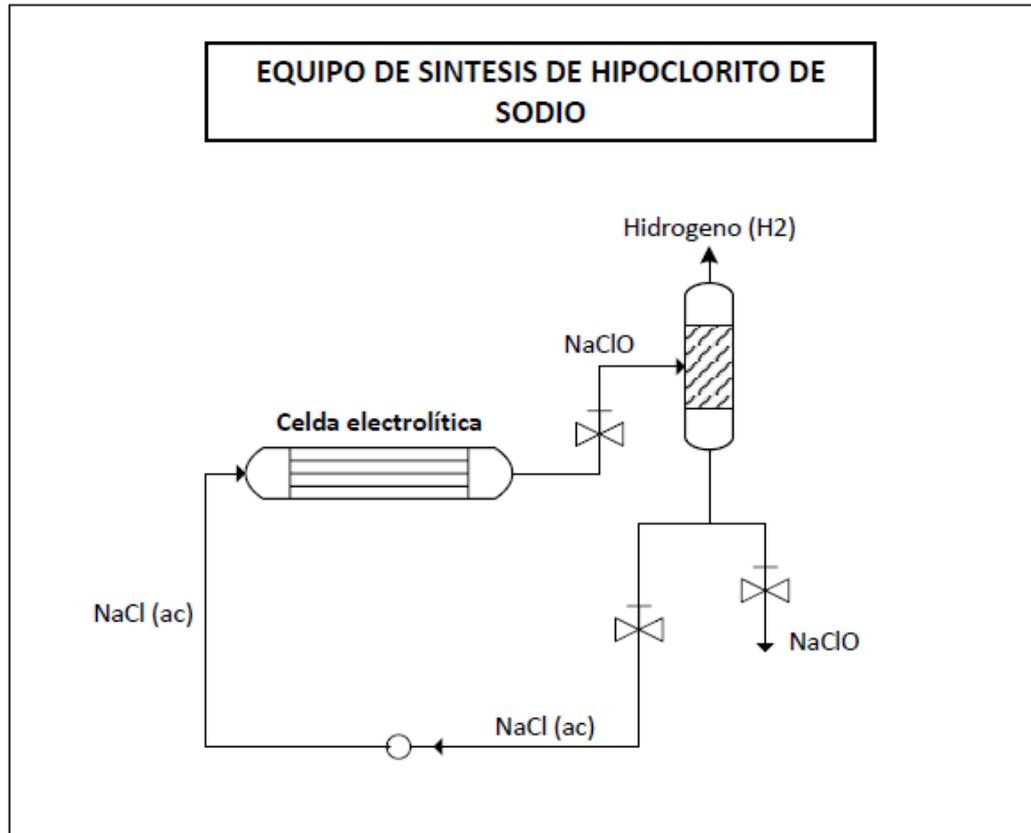
PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOS
<b>Problema general</b>	<b>Objetivo general</b>	<b>Hipótesis General</b>	<b>Variables independientes</b>	Concentración de alimentación de NaCl	g/L	Pesado
¿Se podrá efectuar la síntesis de hipoclorito de sodio a través de una celda electrolítica a nivel de laboratorio?	Efectuar la síntesis de hipoclorito de sodio a través de una celda electrolítica.	Si empleamos una celda electrolítica a nivel de laboratorio, entonces será viable la síntesis de hipoclorito sódico, ya que se analizará la concentración de hipoclorito sódico.	X=Condiciones operativas del proceso de generación de hipoclorito de sodio	Voltaje	Voltio	Voltímetro
				Tiempo	Minutos	Cronometro
<b>Problemas específicos</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>Hipótesis específicas</b>	<b>Variables dependientes</b>	Concentración del producto NaClO	ppm	Titulación
¿Cuáles serán los factores de operación de celda electrolítica más adecuadas para sintetizar hipoclorito sódico?	Seleccionar los factores de operación de la celda electrolítica más adecuadas para sintetizar hipoclorito sódico.	Si, al combinarse los factores de operación de la celda electrolítica, como son potencial eléctrico, concentración de cloruro sódico y tiempo de electrólisis, entonces se ha obtenido hipoclorito sódico de diferentes concentraciones, puesto que se ha analizado la concentración de hipoclorito sódico.	Y=Variables de respuesta del proceso de generación de hipoclorito de sodio.	Consumo específico de energía	Kwh/kg	Amperimetro
¿Cuál es el consumo específico de energía que se requiere para la síntesis de hipoclorito de sodio por medio de una celda electrolítica?	Determinar el consumo específico de energía que se requiere para la síntesis de hipoclorito de sodio por medio de una celda electrolítica.	Si evaluamos la corriente eléctrica en función del tiempo en las pruebas de la celda electrolítica, entonces se obtendrá el consumo específico de energía que necesita la celda electrolítica para la obtención de hipoclorito de sodio.				

## ANEXO 2. FOTOGRAFÍAS DEL DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

### a) Equipo de síntesis de hipoclorito de sodio



**Fuente:** *Instalaciones del laboratorio de operaciones unitarias y procesos de la Universidad Nacional del Callao.*



**b) Celda electrolítica**



**Fuente:** *Instalaciones del laboratorio de operaciones unitarias y procesos de la Universidad Nacional del Callao.*

### **ANEXO 3. ESTANDARIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE SULFATO DE SODIO 0.1 N**

La siguiente formula es usada para calcular la normalidad de tiosulfato de sodio:

$$N = \frac{W}{V \times 0.03567}$$

En donde:

W= Peso del yodato de potasio en (g)

V= Volumen (mL) de tiosulfato de sodio 0.1 N necesario para alcanzar el punto final

0.03567= Peso miliequivalente de  $\text{KIO}_3$

Hacer un promedio de los valores obtenidos de las tres titulaciones y también calcular la desviación estándar y el porcentaje de la desviación estándar relativa del procedimiento de la estandarización.

Las soluciones de tiosulfato de sodio son relativamente estables, pero se descompone en un cierto plazo. La exposición al aire (especialmente dióxido de carbono), la luz y las bacterias aerotransportadas pueden acelerar la reacción de descomposición. Por lo tanto, la re-estandarización debe ser realizada por lo menos mensualmente o más pronto.