

**ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CLORO EN SITIO
PARA LA DESINFECCIÓN DEL AGUA**

LAURA CAMILA FONSECA RUEDA

**Proyecto de investigación para optar por el título de:
ESPECIALISTA EN GESTIÓN AMBIENTAL**

**Asesor:
Diana Marcela Cuestas Parra
Ingeniera Ambiental**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2023**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma de la Directora
Diana Marcela Cuesta Parra

Firma del calificador

Bogotá D.C. Febrero de 2023

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro
Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional
Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones
Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero
Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General
Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decana de la Facultad de Ingenierías
Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora del Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Dra. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestos en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	8
INTRODUCCIÓN	10
OBJETIVOS	12
1. METODOLOGÍA	13
1.1 DISEÑO METODOLÓGICO	13
2. RESULTADOS	14
2.1 ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO	14
2.2 FILTROS DE BÚSQUEDA	14
2.2.1 <i>Criterios de elegibilidad</i>	15
2.2.2 <i>Fuentes de información y estrategias de búsqueda</i>	16
2.2.3 <i>Procesos de selección y recopilación de datos</i>	17
2.2.4 <i>Análisis de datos</i>	18
2.2.5 <i>Análisis de variables</i>	20
2.2.6 <i>Análisis de palabras claves</i>	21
2.2.7 <i>Análisis de autores</i>	22
3. CONCEPTOS BÁSICOS	23
4. VARIABLES A CONSIDERAR EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE HIPOCLORITO DE SODIO	24
4.1 FUNDAMENTO DE LA ELECTRÓLISIS PARA LA OBTENCIÓN DEL HIPOCLORITO DE SODIO	24
4.2 LEYES FUNDAMENTALES DE LA ELECTRÓLISIS	25
4.3. ANTECEDENTES DE PRODUCCIÓN DE CLORO EN SITIO	26
5. ASPECTOS TÉCNICOS DE LA PRODUCCIÓN DE CLORO LIBRE	36
5.1 pH	36
5.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS	38
6. EFICIENCIA DE INHIBICIÓN DE MICROORGANISMOS CON HIPOCLORITO A PARTIR DE ELECTRÓLISIS	46
7. ASPECTOS AMBIENTALES ÓPTIMOS PARA LA PRODUCCIÓN DE CLORO	50

8. CONCLUSIONES

53

BIBLIOGRAFÍA

55

LISTADO DE TABLAS

	pag.
Tabla 1. Términos investigativos utilizados en la búsqueda para el análisis bibliométrico	17
Tabla 2. Características iniciales de la salmuera	27
Tabla 3. Condiciones finales	29
Tabla 4. Diseño compuesto central de dos factores para estudiar la electrolización de aguas oceánicas	30
Tabla 5. Porcentaje de eficiencia de diferentes tipos de células fotovoltaicas basadas en silicio	33
Tabla 6. Composición del agua de mar	50
Tabla 7. Comparación de la composición de las muestras empleadas	51

RESUMEN

La obtención de cloro en sitio, a partir de electrólisis es un proceso que se ha venido desarrollando desde el año 1800 por el científico William Nicholson, al descubrir, que la energía eléctrica poseía la capacidad de participar e intervenir en diferentes reacciones principalmente a base de agua. Sin embargo, no es hasta 1832, que el físico y químico Michael Faraday logra explicar mediante diferentes investigaciones, la relación cuantitativa existente entre las moléculas disociadas y la energía eléctrica introducida en el sistema, dando origen así, a las leyes de las electrólisis aplicadas aun en la actualidad (Smolinka, Kusnezoff, Bergmann, & Garchec, 2022). De ahí, que se hayan desarrollado diferentes aplicaciones como la producción del ion hipoclorito a partir de la descomposición del compuesto cloruro de sodio, para fines en su mayoría sanitarias al poseer un agente desinfectante capaz de inhibir una gran variedad de microorganismos.

Con base a lo descrito anteriormente, la siguiente monografía, compila un total de 49 bibliografías que permitieron identificar los criterios técnicos a contemplar, junto a las variables de interés y las características geográficas y ambientales más aptas para el proceso de obtención del ion hipoclorito mediante la técnica de electrólisis. Con lo cual, fue posible precisar, los aspectos más relevantes que interfieren tanto en la producción de este compuesto, como en la eficiencia de inhibición de diferentes tipos microorganismos patógenos.

Para llevar a cabo dicha revisión, se realizó el análisis documental mediante la herramienta VOSviewer, la cual, comprende un amplio alcance de investigaciones a partir redes bibliométricas que analizan el desarrollo teórico experimental a lo largo de los años de un tema en particular. Es así, como a través de este software se precisaron un total de 669 estudios con sus respectivas fechas, autores, y países de origen. Facilitando, la búsqueda en bases de datos tales como ScienceDirect, Scopus y Scielo, que facultaron el acceso de antecedentes relevantes expuestos en diferentes revistas de investigación, posibilitando el desarrollo de una amplia comparación que finalizó con las siguientes conclusiones; las variables de intensidad de corriente, potencial eléctrico, densidad de corriente, tipo de ánodo y cátodo, tiempo, temperatura, electrolito y pH, son aquellas que no solo son fundamentales para el desarrollo de la electrólisis. Sino también, que la eficiencia de producción de cloro en sitio depende de la correlación existente entre ellas. Por otra parte, se logró evidenciar que el agua procedente de este proceso tiene una alta capacidad de eliminación de microorganismos tales como Staphylococcus aureus, Enterococcus faecalis, Bacillus subtilis var, Escherichia coli, Pseudomonas deceptionensis, al inhibir y evitar el

crecimiento de estos. Mientras que, los aspectos geográficos y ambientales identificados estuvieron asociados; a la capacidad de acceder al recurso hídrico que naturalmente posee el compuesto NaCl, necesario para llevar a cabo el proceso de electrólisis. Por lo anterior, se identificó, que las zonas costeras cuentan con una hidrografía apta que genera un fácil acceso al agua de mar, cuyas características son totalmente adaptables a esta tecnología, debido a sus altas concentraciones de salmuera. Por otro lado, las condiciones climáticas halladas usualmente en estas zonas ubicadas en el caribe permiten, brindar una opción viable tanto en el aspecto económico como técnico, al tener un acceso ilimitado a estos recursos naturales que son favorables para el proceso.

Palabras Clave: electrólisis, óxido y reducción, inhibición, disociación, concentración, electrodos, eficiencia.

INTRODUCCIÓN

El fundamento de la electricidad fue contemplado desde el año 633 a.C a 546 a C, por el científico Tales de Mileto, quien descubrió características de atracción entre el ámbar y fragmentos de corchos al realizar una acción de frotación. Sin embargo, no es hasta el año 1603 que se estudia a modo científico la interacción magnética que puede existir entre diferentes materiales (Garzón, Martínez, & Carmen, 2014). Es así, como Alessandro Volta en el año 1745 a 1827 establece que diferentes metales como lo son; la plata y el zinc sumergidos y rociados con una solución salina tienen la capacidad de producir un flujo eléctrico a través de la solución (Isitan, Yan, Spencer, & Alkawadri, 2020), permitiendo de esta manera, plantear diferentes tipos de diseños para la fabricación y comercialización de baterías que serían usadas para la el hallazgo del principio de la electrólisis, puesto que al conectar un alambre de cobre a dos pilas voltaicas impregnadas por esta misma solución se produce un tipo de efervescencia que indica una generación o producción de hidrógeno en un extremo y una liberación de oxígeno en el otro, concluyendo una posible disociación de hidrógeno y oxígeno en el agua (Cataldo, Arriagada, & Hernández, 2019).

Siguiendo con este razonamiento, a través de la historia este principio ha ido escalonando al punto de presentarse como una solución a la falta de cobertura de agua potable en diferentes zonas o áreas rurales, ya que, a partir de la corriente eléctrica es posible estimular cambios en la estructura molecular de la solución compuesta por Cloruro de Sodio (NaCl) y Agua (H₂O), produciendo de esta manera Hipoclorito de Sodio a baja concentración que tiene entre sus funciones la capacidad de desinfectar el agua (González L. , 2021). A pesar de que un gran número de países en el mundo cuenta con disponibilidad y abastecimiento de este recurso, otra parte sin duda atraviesa por una situación menos alentadora, en donde la escasez del recurso hídrico sumado a las problemáticas sociales, ambientales y económicas, ocasionan que anualmente haya muertes a raíz de enfermedades gastrointestinales producidas por el consumo de aguas no tratadas.

Si bien, la escasez y la mala calidad del agua son un fenómeno que depende de diferentes factores naturales, también es causado por las diferentes acciones humanas que amenazan el abastecimiento de la población mundial. Por lo anterior, a lo largo del desarrollo sustentable se han planteado acciones y estrategias que permiten mitigar el impacto negativo que se ha generado por la ausencia de fuentes hídricas aptas para consumo. Entre estas estrategias se encuentran la producción de cloro libre a partir de electrólisis para la desinfección y tratamiento de agua proveniente en su mayoría del océano, el cual, a partir de sus propiedades permite generar el ion cloro sin necesidad

de contar con productos externos o tecnologías avanzadas para su producción.

Es así, como la electrólisis a partir de agua de mar, comparada con otras tecnologías de desalinización se presenta como una de las mejores opciones a usar. Esto, principalmente por su eficiencia y economía al separar no solo las sales disueltas en medio acuoso, sino también las cargas tanto positivas como negativas generando una desestabilización en el medio presente. Mientras que alternativas ya establecidas como lo son los sistemas de destilación de efectos múltiples, representan un elevado costo energético y económico que dificulta su realización en escenarios en donde existen problemáticas ambientales y de desigualdad social que reducen los posibles recursos para su aplicación (Forero, 2018).

Por lo anterior, el marco de esta monografía, se realiza a partir del análisis de diferentes aspectos, tales como; la eficiencia en la inhibición de microorganismos patógenos, características geográficas para su implementación, aspectos operacionales de interés para la producción de hipoclorito y las variables que intervienen directamente en el proceso de producción de cloro libre como lo es la temperatura, las propiedades óptimas del agua, tipos de membranas, tipo de reacción química e infraestructura física a emplear. Para llevar a cabo dicho análisis, se inicia con una revisión bibliométrica en la cual se seleccionan cuidadosamente diferentes fuentes de información en su mayoría artículos científicos, informes y monografías de acuerdo a los criterios de elegibilidad que se plantean en la primera parte del documento, una vez obtenidas las investigaciones a estudiar se expone la evolución de los resultados obtenidos y se documentan los conceptos básicos tratados en esta monografía. Para finalmente encontrar en el siguiente capítulo, el análisis respectivo de los aspectos identificados de mayor relevancia en cada uno de los estudios revisados que permitan dar cumplimiento con los objetivos planteados a continuación.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar los criterios técnicos para la producción de cloro en sitio para la gestión en la desinfección del agua.

Objetivos específicos

- Identificar las variables de interés para la producción de ion hipoclorito.
- Establecer la eficiencia en la inhibición de microorganismos patógenos a través de experiencias de investigación.
- Determinar las características geográficas proyectadas para la implementación de sistemas de desinfección de agua en sitio.

1. METODOLOGÍA

1.1 Diseño Metodológico

Teniendo en cuenta los planteamientos definidos en la primera parte del documento, el desarrollo del componente metodológico fue estructurado en fases; la primera fase en su primer momento se centra en establecer la etapa de identificación de conceptos claves de la temática, mediante la selección de los artículos encontrados en las bases de datos Scopus, ScienceDirect, Journal Science y Google Scholar (disponibles online), usando la herramienta de Scopus y VOSviewer. Posteriormente se procedió a realizar el posicionamiento e identificación de las unidades de análisis en mapas bidimensionales, para el procesamiento cuantitativo de los datos. Para ello, se utilizó el software VOSviewer, herramienta que permite la visualización de redes bibliométricas.

La segunda fase consiste en la estructuración de la búsqueda, la cual se construye a partir de los términos fundamentales de la temática, como lo son; electrólisis en agua de mar, obtención de cloro libre en sitio y desalinización. En donde se analizan las principales variables en los resultados de las bases de datos consultadas; resultados por año, el comportamiento por revistas de publicación y los documentos por subáreas temáticas, autores, países, entre otros que permiten “evaluar la actividad científica y el impacto tanto de la investigación como de sus fuentes” (Otalora, 2008). Para así posteriormente precisar las variables investigativas en relación con el tema de estudio.

En la fase 3 se procede a documentar los conceptos básicos para el desarrollo de producción de cloro en sitio. En donde a partir del análisis realizado a la información seleccionada, se precisan las variables fisicoquímicas, operativas, geográficas y ambientales óptimas para llevar a cabo este proceso, teniendo en cuenta, principalmente la eficacia de inhibición de microorganismos y los porcentajes de desinfección obtenidos.

La cuarta y última fase consiste en la discusión de resultados, a partir de la comparación de las diferentes investigaciones estudiadas, lo que permite concluir aspectos claves para su implementación en poblaciones que carecen de agua potable.

2. RESULTADOS

2.1 Análisis Bibliométrico

La metodología que se utilizó en esta revisión bibliográfica se desarrolló en varias etapas, las cuales se describen en el siguiente diagrama:

Figura 1.

Fases metodológicas de la monografía



Nota. La Figura 1 expone la metodología que está compuesta por cuatro fases que permiten hacer síntesis del uso de dos herramientas para análisis bibliométricos (Scopus y VOSviewer).

2.2 Filtros de búsqueda

En razón a lo antes expuesto, en la revisión exhaustiva de artículos científicos encontrados, se tuvo en cuenta que cumplieran con todos los filtros establecidos en su búsqueda, los cuales fueron los siguientes:

1. La similitud en el tema principal (obtención de cloro en sitio)
2. Actualidad investigativa, que estuvieran publicados en un rango temporal no mayor a 10 años de antigüedad.

3. Que evaluaran otras tecnologías y metodologías de desalinización para poder realizar una comparación previa.
4. Que tuvieran diferentes variables de estudios con el fin de poder conocer diferentes escenarios que interfieren en los resultados finales.

Para la fase tres de la metodología se hace una lectura detallada de treinta y uno (31) artículos científicos que discuten los conceptos básicos de la obtención de cloro en sitio en diferentes escenarios, con variables distintas. Lo que nos permite realizar una comparación más real, siguiendo la línea de objetivos planteados desde un inicio, y permitiendo él cumpliendo de las 4 fases antes mencionadas.

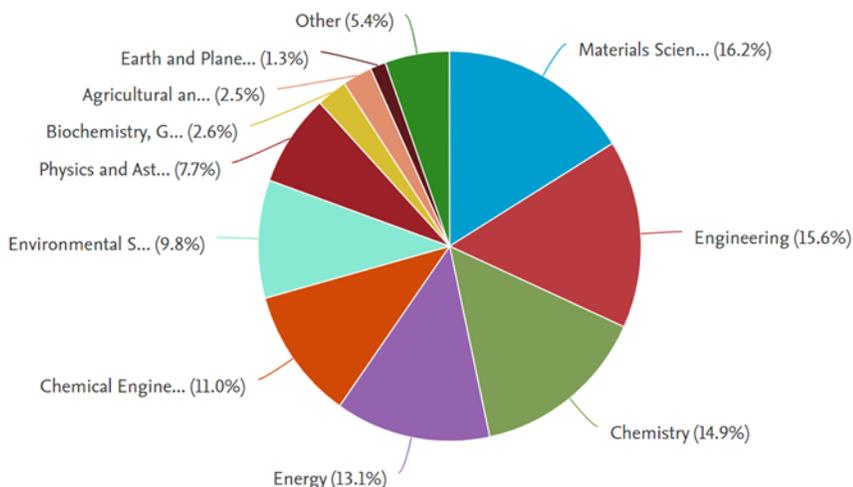
2.2.1 Criterios de elegibilidad

Estos criterios se establecen de la siguiente manera:

1. Área de la temática a estudiar: las investigaciones revisadas son de carácter ingenieril, desarrollo y avances en tecnologías ambientales, estudios de energía, química, ingeniería química y afines en relación con la electrólisis en el agua de mar, por lo que se aclara que no solo se busca la investigación propia de esta tecnología sino que también la comparación de otras tecnologías que permita diferenciar e identificar los pro y los contra de las diferentes opciones para el objetivo clave que es la desalinización del agua de mar y las principales ventajas que se pueden aprovechar. En el siguiente diagrama se pueden ver las diferentes áreas relacionadas al estudio de la electrólisis en el agua de mar, afirmando las áreas mencionadas.

Figura 2.

Áreas de desarrollo investigativo del tema en estudio: obtención de cloro en sitio



Nota. El gráfico representa las ramas científicas en las cuales se ha estudiado temas referentes a la obtención de cloro en sitio. Tomado de Scopus,2022.

2. Criterios de calidad: Estudia los procesos metodológicos de los artículos en revisión. Por lo que se pueden clasificar las técnicas utilizadas dentro del estudio, metodologías desarrollo y formas de avance. Por lo que en esta monografía se clasificaron estas tres como criterios de calidad, ya que permite evaluar con un espectro mayor la investigación y los avances en el desarrollo de este. Por ejemplo, en los artículos estudiados se tuvo en cuenta como criterios de calidad el análisis de desafíos técnicos, lo que permite la propuesta de varias posibles direcciones de investigación futuras, también las perspectivas, incluida la evaluación de criterios ambientales, técnicos y económicos.

3. Antecedente Científico: análisis conceptual y metodológico a partir de los antecedentes. Es decir, las veces que ha sido citado el artículo, por otros autores que han utilizado las investigaciones ya sea por los antecedentes o por el método que se desarrolla durante el análisis. Además, facilita identificar la prioridad investigativa que la información puede llegar a tener.

2.2.2 Fuentes de información y estrategias de búsqueda

Para dicha revisión se ha recopilado información en Scopus, herramienta que contempla artículos

científicos y demás material investigativo de varios sitios web académicos importantes como: Science Direct, Journal Science, y otras bases de datos, en las cuales se pueden encontrar diferentes tipos de publicaciones. De esta manera se garantiza que la documentación se realiza con una mayor fundamentación utilizando fuentes y recursos confiables. Dentro de las estrategias de búsqueda se estableció una estructura con el fin de facilitar el proceso, es decir utilizando filtros de búsqueda, teniendo en cuenta localizaciones geográficas de investigación relevante, palabras claves y metodologías desarrolladas en las investigaciones.

2.2.3 Procesos de selección y recopilación de datos

El proceso de selección de los artículos científicos y material académico utilizado para esta revisión se realizó teniendo en cuenta lo siguiente:

1. Preguntas clave. ¿Cómo la electrólisis en agua de mar puede ser una opción para la obtención de cloro en sitio que puede ser usado en la desinfección del agua? ¿Por qué es importante este proceso y cuáles son las ventajas de las cuales se puede sacar provecho? ¿Cuáles son las investigaciones previas y más actuales en este proceso de electrólisis? ¿Cuál es el método más eficiente para la desalinización del agua de mar?
2. A partir de las preguntas se definieron algunos términos investigativos que se utilizaron previamente en la búsqueda bibliográfica en Scopus. Los términos investigativos y los documentos encontrados por cada uno de ellos fue el siguiente:

Tabla 1.

Términos investigativos utilizados en la búsqueda para el análisis bibliométrico

Término investigativo	Número de documentos encontrados
<i>Seawater electrolysis</i>	449
<i>Desalination</i>	144
<i>Electrocatalysts and water</i>	39
<i>Seawater splitting</i>	37

Nota. Esta tabla muestra el número de documentos encontrados por término investigativo en la herramienta Scopus. Fuente: Autora (2022).

Teniendo en cuenta lo anterior, se manejó un rango temporal de 10 años, es decir, las publicaciones realizadas desde 2012 hasta el 2022. De acuerdo con los resultados arrojados, el término investigativo con mayor documentación es: *Seawater electrolysis* con 499 encontrados. Los términos investigativos se proponen en inglés, puesto que los resultados son mayores, ya que las investigaciones suelen presentarse en este idioma, y esto permite encontrar fuentes de otros países inclusive que no manejan el inglés como lenguaje nativo. Por otra parte, se aplicó como operador booleano “OR” el cual, permitió visualizar aquellos resultados que referían al menos uno de los términos investigados, lo que fue muy conveniente a la hora de realizar la revisión bibliográfica, puesto que, se logró realizar un análisis mucho mas profundo de no solo aquellos estudios que empleaban el agua de mar, sino también, de aquellos que se basaron en disoluciones preparadas. Permitiendo distinguir con más claridad, la importancia de las variables de diseño dentro del sistema a evaluar.

2.2.4 Análisis de datos

La búsqueda bibliográfica encontrada utilizando la herramienta de Scopus permite realizar dos tipos de revisiones. Con los términos investigativos se logra una revisión exhaustiva, es decir, que permite visualizar de una manera general las investigaciones realizadas en torno a la electrólisis del agua y por otro lado una revisión descriptiva que se caracteriza por manejar datos actuales y además permite conocer cualidades relacionadas con la calidad de las investigaciones. A continuación, se presentará un análisis detallado de la búsqueda bibliográfica utilizando las herramientas de Scopus y VOSviewer.

Figura 3.

Rango temporal de 10 años

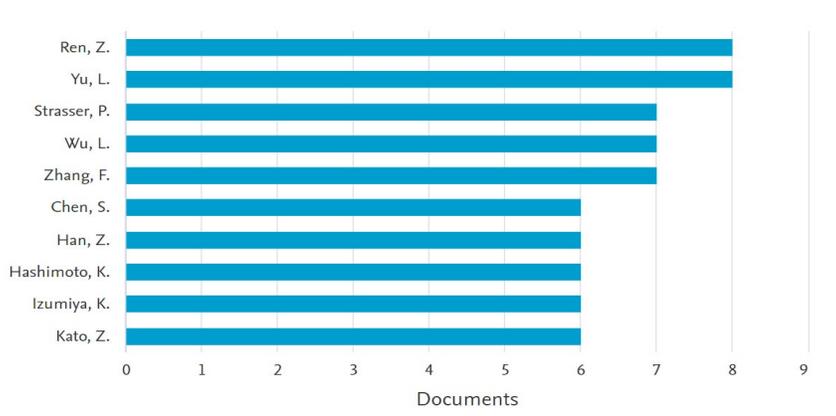


Nota. La Figura 3 muestra la cantidad de documentos realizados en un rango temporal de 10 años en relación con la electrólisis en agua de mar. Tomado de Scopus, 2022.

En esta gráfica se puede observar el avance investigativo de los últimos 10 años, donde se evidencia un crecimiento exponencial y un pico importante de publicaciones en el año 2021, con 125 artículos publicados. En lo que lleva del año se han elaborado 44 artículos relacionados con la electrólisis en el agua de mar y obtención de cloro en sitio. Esto se atribuye a que este tema ha cobrado relevancia día tras día a partir de la necesidad de encontrar nuevas tecnologías y procesos que permitan la obtención de agua potable utilizando otras fuentes de agua, y que por sus características iniciales no se considera apta para el consumo humano. Principalmente, de allí parte el crecimiento investigativo en este tema, además de que se ha establecido otras ventajas alrededor de estos estudios.

Figura 4.

Comparación de documentos encontrados



Nota. La figura 4 muestra la Relación entre autores destacados en la investigación de la electrólisis en el agua de mar y los documentos publicados. Tomado de Scopus, 2022.

El análisis por autor es fundamental si se quiere identificar las personas que han trabajado más en el tema de la electrólisis en agua de mar y obtención de cloro en sitio. Zhan Ren, es el autor que tiene más publicaciones con un total de 8 investigaciones publicadas, sus estudios actualmente se realizan en la Universidad de Texas, en donde ha abordado más de 45 temas relacionados con el manejo y análisis del agua, en diferentes fuentes.

Por otra parte, los territorios donde más se realizan investigación de electrólisis en agua de mar, es en China seguido por Estados Unidos y Corea del Sur, este análisis es importante no solo porque permite identificar en qué lugares del mundo se adelantan las investigaciones de mayor antigüedad, sino porque también se puede realizar una comparación con Latinoamérica en donde la investigación es casi nula, a pesar de que los litorales latinoamericanos se presentan como una alternativa de aprovechamiento y desarrollo de tecnologías para realizar procesos de electrólisis de agua de mar y adicional que traería múltiples beneficios para las comunidades que ocupan y habitan en estos lugares que cuentan con difícil acceso de agua potable.

2.2.5 Análisis de variables

En el análisis de variables se usó la herramienta VOSviewer para su interpretación, tanto de palabras claves como de autores. Principalmente, este análisis se realiza desde tres diferentes

3. CONCEPTOS BÁSICOS

- **Demanda de cloro:**

La demanda de cloro corresponde a la diferencia que existe entre “la cantidad de cloro aplicada al agua y la de cloro disponible libre” (Ibarguen & Bernal, 2012), el cual entra en contacto con los diferentes elementos presentes en el agua con el fin de oxidarlos, lo que ocasiona un consumo de cloro denominado demanda de cloro (Hernández, 2018).

- **Cloro residual libre:**

Cantidad de cloro presente en el agua de forma de ácido de hipoclorito HClO que permanece, con el fin de cumplir funciones de inhibición de microorganismos patógenos que puedan llegar a estar en el recurso designado para consumo humano (Shadan & Kiyoko, 2021).

- **Cloro residual combinado:**

El cloro residual combinado es aquel que se encuentra en el agua una vez se ha oxidado el nitrógeno presente en forma de amoníaco lo que produce la formación de cloraminas NH_2Cl que cumplen la función de desinfección (Shadan & Kiyoko, 2021).

- **Hipoclorito de sodio:**

Compuesto de cloro con propiedades que permiten su aplicación como desinfectante o blanqueador. Ya que, se caracteriza por ser un oxidante con fórmula molecular NaOCl fuerte el cual es capaz de reducir gran cantidad de sustancias (Shadan & Kiyoko, 2021).

4. VARIABLES A CONSIDERAR EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE HIPOCLORITO DE SODIO

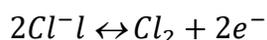
4.1 Fundamento de la electrólisis para la obtención del hipoclorito de sodio

La electrólisis es el proceso en el cual sucede una reacción de oxidación y reducción no espontánea a partir de una transferencia de electrones que se da mediante la aplicación de corriente eléctrica que permite la separación de iones. Es así, como en función de un ánodo es posible atraer los iones negativos y en función de un cátodo atraer solo iones positivos efectuando así una disociación en donde se oxida la especie que pierde los electrones y se reduce la que los gana (Gómez, Lucia Noval, 2017). Generalmente la electrólisis se desarrolla mediante una celda electroquímica en la cual se encuentran materiales de propiedades tales como: alta estabilidad química y altos sobre potenciales que eviten afectaciones en las propiedades fisicoquímicas y mecánicas del material. De esta forma, los electrodos mayormente empleados para la obtención de hipoclorito de sodio están dados por ánodos de grafito, titanio con revestimiento de platino y cátodos de grafito, acero inoxidable, níquel, titanio sin revestimiento, que son situados en un medio acuoso en el cual existe una disolución de NaCl, que a partir de un circuito eléctrico cerrado tiene la capacidad de producir hipoclorito de sodio (Hernández, 2018). A continuación, se expondrán los mecanismos de reacción dados a partir del proceso de electrólisis anteriormente mencionado.

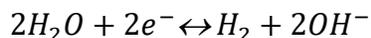
Como primera etapa de transformación se da la disolución de cloruro de sodio que da como residuo los iones positivos de sodio (Na^+), los iones negativos de cloruro (Cl^-) y moléculas de agua (H_2O) (Hernández, 2018), tal como se muestra a continuación en la reacción.



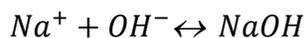
Una vez ocurrida esta disociación se aplica corriente que inicia la transferencia de electrones entre ánodo y cátodo cambiando el estado de oxidación de aquellas partículas que se oxidan o se reducen, por lo que las partículas cargadas negativamente del cloro son atraídas hacia el ánodo haciendo que dos partículas de cloro interactúen ocasionando un proceso de oxidación lo que da lugar a la obtención de cloro gaseoso (Hernández, 2018).



Mientras el anterior proceso ocurre, el cátodo sufre una semirreacción de reducción de las moléculas de agua presentes. Las acules interactúan con los electrones provenientes del ánodo, lo que produce los grupos hidroxilos y como subproducto el hidrógeno gaseoso.



Los iones de sodio que no interactuaron en ninguna de los procesos químicos anteriormente descritos interactúan con los iones hidroxilos que son generados en la celda para la producción de hidróxido de sodio, ocasionando que el medio electrolítico se convierta de carácter básico.



Para finalizar, ocurre la reacción que produce el hipoclorito de sodio como agente oxidante, en donde el cloro gaseoso producido en el ánodo reacciona con el hidróxido de sodio presente en el electrolito con la misma velocidad de formación de gas, tal como se muestra a continuación.



4.2 Leyes fundamentales de la electrólisis

Primera Ley de Faraday: “La cantidad de un elemento que se deposita o se libera en un electrodo es directamente proporcional a la cantidad de electrodo que pasa por una disolución.” (Gómez, Lucia Noval, 2017). En el caso de la electrólisis a partir de cloruro de sodio o salmuera, esto significa que, si se aplica el doble de intensidad de electricidad que pasa por la disolución el resultado que se obtiene de cloro y de sodio igualmente se duplicara. La expresión matemática de esta ley es dada a partir de la siguiente ecuación:

$$m \propto Q: \text{de donde } m = e * Q$$

Donde m es la masa de la sustancia alterada, Q es la cantidad de electricidad y es el equivalente electroquímico.

Segunda Ley de Faraday: “El peso de los elementos liberados por la misma cantidad de corriente es directamente proporcional a sus equivalentes” (Gómez, Lucia Noval, 2017). Vale resaltar que el equivalente químico de un elemento corresponde al cociente entre el peso atómico y su valencia, cuyo resultado se encuentra dado por unidades de coulomb (Pérez, 2017). Para liberar un equivalente químico de un elemento se requiere aplicar un faradio por lo que se puede expresar de la siguiente manera:

$$e = \frac{\text{Peso equivalente}}{F} = \frac{E}{F}$$

$$e = \frac{g}{\text{coulomb}}$$

F= Faradio = 96500 coulomb/mol debido a que 1 F es la cantidad de electricidad necesaria para liberar un equivalente químico de cualquier elemento y este es igual a 96500 coulomb/mol (Pérez, 2017). Por otra la parte la electricidad está compuesta por:

$$Q = I * t$$

Donde I es igual a la intensidad de corriente (amperes) y t es igual a tiempo (segundos).

4.3. Antecedentes de producción de cloro en sitio

Factibilidad de producir hipoclorito de sodio para fines de desinfección utilizando salmuera de desalinización (Baydum & Sarubb, 2022).

Siendo el proceso de desalinización uno de los más aplicados para la obtención de agua dulce, en lugares como el archipiélago de Fernando de Noronha en el noroeste de Brasil se emplea esta técnica en agua proveniente del mar, permitiendo abastecer gran parte de los habitantes y turistas que visitan esta zona volcánica. Sin embargo, a pesar de que este tratamiento supone grandes beneficios sociales, representa un alto riesgo ambiental. Puesto que, la salmuera resultante del proceso está compuesta por sales altamente concentradas que tienen la capacidad de afectar significativamente el medio ambiente al ser dispuestas en diferentes fuentes de agua o en muchos casos directamente en el suelo. Pues de acuerdo a los porcentajes analizados dentro de la investigación, entre el 30% y el 70% corresponden a residuos provenientes del total del agua captada para dicho tratamiento, en donde de 1l de agua de mar se obtienen alrededor de 0,5 ml de agua dulce. Por lo anterior, el presente artículo tiene como objetivo exponer un método de mitigación como repuesta a la alta generación de salmuera a partir de la producción de hipoclorito de sodio en sitio. En consecuencia, se realizaron diferentes ensayos de laboratorio usando un generador estático que produjo soluciones oxidantes que fueron utilizadas en la desinfección del agua. Para lograr dicha solución, la salmuera de rechazo o de producto de la desalinización presento las siguientes características.

Tabla 2 .*Características iniciales de la salmuera*

PARÁMETROS	SALMUERA DE RECHAZO 1	SALMUERA DE RECHAZO 2
Ph a 25 °C	7.9	8.0
Turbidez (uT)	0.2	0.6
Color aparente (uH)	2	<0.1
Conductividad (µS/cm)	65800	30665
Alcalinidad (mg/L)	227.1	2 40.9
Dureza (mg/L)	12911.2	13 934.8
Calcio (mg/L)	838.1	9 63.84
Magnesio (mg/L)	2628.2	28 00.71
Cloruro (mg/L)	40598.9	40 931.3
Sulfato (mg/L)	5427.0	6 068.8
Nitrato (mg/L)	9.6	1 1.5
Aluminio (mg/L)	0.4	0 0.6
Boro (mg/L)	5.6	9 0.1
Bario (mg/L)	<0.02	<0.02
Cobre (mg/L)	0.010	0.147
Hierro (mg/L)	<0.1	0.2
Potasio (mg/L)	611.0	1 932.9
Litio (mg/L)	0.5	0.2
Manganeso (mg/L)	<0.02	0.07
Sodio (mg/L)	16087	2 2277
Fósforo (mg/L)	0.6	0.9
Cinc (mg/L)	<0.05	0.13

Nota. La tabla anterior muestra las condiciones iniciales de la salmuera tomados en cuenta en la investigación. Baydum, V., & Sarubb, L. (2022). Factibilidad de producir hipoclorito de sodio para fines de desinfección utilizando salmuera de desalinización. Brasil: Scopus. Obtenido de [file:///C:/Users/Arq.%20Fonseca/Downloads/factibilidadart1monografia%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/Arq.%20Fonseca/Downloads/factibilidadart1monografia%20(3).pdf).

Una vez obtenida la salmuera con las características anteriormente descritas se utilizó un generador estático con una capacidad de producción de 150l de cloro. Las pruebas de electrólisis se realizaron por lotes y en este proceso se utilizó un reactor con cabida de 8l, en donde se escogieron como electrodos un ánodo y un cátodo compuestos por placas de titanio que contaban con una distancia de 3 mm entre cada una de ellas, un espesor de 1 mm y un área total de 84 cm² y las placas se conectaron a cables de alimentación lo que permitió iniciar el proceso electrolítico y a su vez la transformación de salmuera en hipoclorito de sodio y gas de hidrógeno a partir de una fuente de corriente alterna con alimentación de 220V/6A.

Adicional a lo anterior, se realizaron experimentos de cribado para determinar el cloro (Cl₂) y producción de hipoclorito de sodio (NaClO) a lo largo del tiempo de electrólisis, lo que permitió identificar que las concentraciones en la producción de cloro en sitio tienen la capacidad de estabilizarse luego de 4 horas de operación. Luego del proceso de electrólisis se pudo observar en el equipo, la aparición de incrustaciones de sal que correspondían a 6,5l de los 8l de salmuera inicial, lo que representa un 18,75 removido. Por ello, se enfatiza la necesidad de seguir evaluando la continuidad de uso y el momento de saturación de los electrodos con la ocurrencia de mayor incrustación. Aparte del resultado de la obtención de cloro en sitio, dicha solución oxidante fue probada en aguas secundarias de procesos biológicos anaerobios, ya que se consideró, que estas aguas presentan patógenos y propiedades mucho más desafiantes. Por lo que se logró comprobar que al haber una exposición de 30 minutos a una concentración que va desde 5mg/l a 30mg/l de cloro, se logra obtener una concentración de coliformes termo tolerantes de 103 MPN/100ml o menos lo que significa una remoción del 99% de estos.

Como resultado, se obtuvo una concentración de cloruro de 40598 mg/L en la salmuera 1 y 40951 mg/L en la salmuera 2, luego del proceso de electrólisis que duro 24 horas en la celda electrolítica, en donde el contenido de cloro activo e hipoclorito se estabilizó después de cuatro horas de operación, la media producción de cloro fue de 2600 mg/L con la salmuera 1 y 3050 mg/L con la salmuera 2 concluyendo que aunque la literatura menciona en varias oportunidades que si la concentración de cloruros es alta, esto afecta la producción de cloro en sitio, en esta investigación los datos de la producción de cloro evidencian que la concentración de sal es proporcional a la producción de cloro, esto puede deberse a que se usa la salmuera y no en agua propia del mar.

Algo importante a recalcar sobre las condiciones puntuales de esta investigación, es que la salmuera presentaba altos niveles de calcio y magnesio, parámetros como: la dureza total, sulfatos y cloruros presentaron valores diez veces superiores y por encima de los máximos permitidos por la autoridad ambiental brasileña; sin embargo estos minerales de la salmuera resultante de procesos de desalinización se pueden llegar a reutilizar para mitigar la escasez de minerales hasta cierto punto y reducir significativamente el precio del agua desalinizada, la cual actualmente presenta un valor muy alto y por ello su implementación de zonas que lo necesitan se ve imposible.

En cuanto a la generación de cloro en sitio la alta dureza de la salmuera si es un factor limitante por la formación de una fina película caliza formada esencialmente por CaCO_3 y magnesio $(\text{OH})_2$. Además, otros minerales como los metales alcalinotérreos tienen a precipitar como hidróxidos metálicos depositándose en membranas y/o electrodos reduciendo así su eficiencia.

La temperatura jugó un papel importante en la generación de cloro en sitio, puesto que cuando se presentaban temperaturas altas, estas se asociaban con valores de conductividad baja, y, por lo tanto, se necesita más energía para generar cantidades importantes de cloro, mientras que el pH no arrojó mayor variación, como se muestra a continuación.

Tabla 3.

Condiciones finales

Reacción Tiempo (h)	Rechazar salmuera 1				Rechazar salmuera 2			
	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mS/cm)	Residual cloro (mg/L)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mS/cm)	Residual cloro (mg/L)
6	5.5	48	66,9	1950	7.0	45	99.3	4350
8	6.5	52	130.6	2200	6.9	48	98.6	3900
24	6.7	54	127	2600	7.0	55.5	101.2	3050

Nota. La tabla anterior muestra los comportamientos obtenidos durante el proceso de la electrólisis por parte de la salmuera, a diferentes condiciones con el fin de valorar las óptimas para la producción de hipoclorito de sodio en sitio (Baydum & Sarubb, 2022).

Efectos de la distancia entre electrodos y la corriente eléctrica en la generación de cloro en agua profundas electrolizadas (Wnag & Yao, 2017).

La investigación se realizó adaptando un diseño compuesto para estudiar los efectos de la distancia entre los electrodos y la corriente eléctrica en la eficiencia de generación de hipoclorito a partir del proceso de electrolisis de agua obtenida a 662 m de profundidad del océano pacífico, ubicado en la costa Huailen en el este de Taiwán.

Inicialmente se tomaron varias muestras de 1.600 ml, y se electrolizaron por un periodo de 2 horas en un vaso de vidrio, a partir de un ánodo y un cátodo de 50 mm de largo y 25 mm de ancho cuyo material estaba compuesto por electrodos de malla de titanio enchapados con 3.7 metrom de platino que se encontraban a 60 mm de bajo de la superficie del líquido. En este estudio se optó por mantener una corriente constante, y la distancia de los electrodos y la corriente fueron probados a partir de diferentes niveles, tal como se muestra a continuación.

Tabla 4.

Diseño compuesto central de dos factores para estudiar la electrolización de aguas oceánicas

Nivel	Distancia entre electrodos (mm)	Corriente eléctrica (A)
1	6.7	2.5
2	8.7	2.9
3	13.4	4.0
4	18.1	5.1
5	20.1	5.5

Nota. La anterior tabla expone las 5 condiciones planteadas para el análisis de eficiencia de obtención de cloro en sitio. Wnag, S., & Yao, S. (2017). Efectos de la distancia entre electrodos y la corriente eléctrica en la generacion de cloro en aguas profundas electrolizaadas del oceano. Taiwan: Ciencia Directa.

Teniendo en cuenta las condiciones de operación aplicadas, se obtuvo como resultado que, a pesar de la cercanía o lejanía de los electrodos, el sistema no se vio afectado por la distancia existente entre estos. Lo anterior, a razón de que se escogió un modo de corriente constante. Sin embargo, la producción de cloro por otra parte si se vio afectado por la corriente eléctrica más no por la distancia, ya que, la alta corriente generó una alta concentración de cloro en donde a una electricidad de 5.0 A generó una producción de 7000 mg Cl₂/l, mientras que a una intensidad de 2.5 A generó una producción de 2000 mg Cl₂/l. Por otra parte, la variable de temperatura se vio afectada al aumentar la corriente eléctrica, puesto que también aumentó durante el proceso de electrólisis debido a la conversión continua de energía eléctrica en calor causando la evaporación del cloro. Por lo que vale destacar que al alcanzar temperaturas de 50 °C hay una pérdida significativa del hipoclorito.

En consecuencia con lo anterior, se llegó a la conclusión que si bien no se afectó el sistema con la distancia de los electrodos, la eficiencia eléctrica si, ya que tiende a disminuir drásticamente cuando existe un aumento en el potencial eléctrico y al mismo tiempo cuando existe una mayor distancia entre los electrodos, puesto que a una corriente de 5.0 A y una distancia de 20 mm genera una eficiencia eléctrica de 22 mg Cl₂/l, mientras que una electricidad de 2.5 A y una distancia de 8 mm genera una eficiencia de aproximadamente 28 mg Cl₂/l. Con base a lo anterior se hayo que, a una distancia menor de 11,7 mm y una corriente eléctrica baja significan las mejores condiciones de diseño y funcionamiento desde el punto de vista energético.

Adicional a esto, se encontró que una aplicación útil para el saneamiento de aguas superficiales. El agua electrolizada que contenía 0,76 mg/L de cloro logró eliminar 90% de las bacterias presente en una muestra de agua de mar que poseía vísceras de los erizos de mar y *Echerichia coli* proveniente de las ostras, entre otras bacterias patógenas.

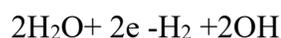
Estudio de viabilidad de la electrólisis del agua de mar para el sistema de energía híbrido fotovoltaico/célula de combustible para las zonas costeras de Tailandia (Srisiriwat & Pirom, 2017)

Teniendo en cuenta los aspectos estudiados a lo largo de la investigación, fue posible denotar la

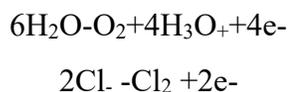
facultad de desarrollar un sistema híbrido que permitiese combinar la producción de energía renovable con la producción de agua potable en sitio, cuyo proceso consistió en utilizar paneles fotovoltaicos como medio de recolección de energía solar que permitieron provocar una interacción entre las cargas eléctricas positivas y negativas a través de una pila de combustible, produciendo así el ion de hidrógeno. Lo anteriormente descrito se logró a partir del proceso de electrólisis, el cual se basó principalmente en el uso de agua de mar como materia prima principal, siendo esta característica uno de los fundamentos más importantes de la investigación al desarrollarse en Samut Sakhon zona costera de Tailandia, la cual, no solo cuenta con un déficit de agua potable, sino también con escasez de energía eléctrica.

Para llevar a cabo dicho proyecto, se realizaron pruebas que permitieron evidenciar que las condiciones óptimas para lograr un buen rendimiento están dadas por una temperatura de 26°C, un material en el área del cátodo de acero inoxidable de 12,6 cm² e igualmente un material en el área del ánodo de acero inoxidable de 12,6 cm², con un voltaje de entrada de 3v y una densidad de corriente de 3,974 mA/cm². Que dieron como resultado 1 litro/h de hidrógeno a una potencia de 9,6 W, lo que represento una eficiencia del 41,7%, ya que dio como resultado 190,4 kWh. Kg. Hidrogeno. A continuación, se exponen las reacciones químicas evidenciadas durante el proceso de electrólisis.

Producción de hidrógeno en el cátodo



Producción de oxígeno y cloro en el ánodo



Tal como se denota en las reacciones observadas anteriormente, durante el proceso de electrólisis no solo se logra la separación del ion hidrógeno, el cual es ion central de la investigación. Sino también, se denota la disociación de aniones de cloruro que tiene la capacidad de producir hipoclorito de sodio al combinarse el cloro gas con el cloro líquido, dando como resultado ácido hipocloroso, que, al reaccionar con el sodio presente, podría formar el primer compuesto ya antes mencionado, tal como se muestra a continuación:

- Polo positivo:



- Producción de ácido hipocloroso



Una vez puesto en marcha el desarrollo de la electrólisis los autores procedieron a almacenar el hidrógeno en un tanque diseñado con un compresor que desempeña la función de regular tanto la presión de entrada como salida, para así utilizar el hidrógeno acumulado como combustible para la producción de energía eléctrica durante el día a partir del panel. Lo anterior, a razón de que el sistema fotovoltaico no produce energía 18 horas al día lo que significa que el experimento produjo alrededor 10 kW a partir de 2.000 l de agua electrolizada para lograr la cobertura total de energía durante el día.

Para obtener el resultado anteriormente descrito los investigadores concluyeron que la célula fotovoltaica basada en silicio monocristalino es la más apta para llevar a cabo este tipo de sistemas híbridos, ya que demostraron una eficiencia de 24% en el laboratorio y del 14% al 17% durante la producción.

Tabla 5.

Porcentaje de eficiencia de diferentes tipos de células fotovoltaicas basadas en silicio

Tipo/Material de la celda fotovoltaica	Nivel de eficiencia en Laboratorio (%)	Nivel de eficiencia en Producción (%)
Basado en silicio monocristalino	24 (aproximado)	14-17
Basado en silicio policristalino	18 (aproximado)	13-15
A base de silicio amorfo	13 (aproximado)	5-7

Nota. La anterior tabla muestra los niveles de eficiencia y producción obtenidos durante la investigación. Srisiriwat, A., & Pirom, W. (2017). Feasibility Study of Seawater Electrolysis for Photovoltaic/Fuel Cell Hybrid Power System for the Coastal Areas in Thailand. Thailand: Master Ciencia. Obtenido de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/241/1/012041>.

Producción electroquímica completa y sostenible de dióxido de cloro (Moratalla, Moteiro, Unez, Dos Santos, & Rodrigo, 2022)

Esta investigación se centró en probar diferentes dispositivos de base electroquímica capaces de producir cloratos y peróxido de hidrógeno en diferentes condiciones de operación para su generación. Y la utilización, de estos compuestos químicos ya distribuidos comercialmente para el análisis de eficiencia en el momento de la formación y producción de dióxido de cloro.

Para realizar las pruebas desarrolladas en el proyecto se tuvieron en cuenta las siguientes variables de ejecución para la formación del compuesto final; se manejaron dos reactores de vidrio de 250 ml los cuales se mantuvieron con una temperatura constante y bajo agitación suave (350 rpm) con los reactivos comprados como un primer experimento y los compuestos de peróxido de hidrógeno y cloratos formados como segundo, a un pH extremadamente ácido que fue dado a partir de ácido sulfúrico.

Inicialmente se optó por utilizar 10 ml de una solución de clorato comercial (5000 mg.L- NaClO_3) con 6 ml de agua oxigenada comercial (3300 mg/l) y 25 ml de ácido sulfúrico (5,0M) a una temperatura de 50°C , y un segundo modelo que estuvo compuesto por 10 ml de clorato comercial, 4 ml de agua oxigenada, con 25 ml ácido sulfúrico a una temperatura de 83°C . Lo que evidencio que a temperaturas más altas existe una mayor eficiencia, ya que a 83°C la concentración máxima de dióxido de cloro se alcanzó en un periodo de 3h la cual corresponde a 8,8 mmol L de ClO_2 . Mientras que a una temperatura de 50°C no existe alguna estabilidad en un periodo menor a un día.

Por otra parte, para la generación de cloratos y peróxidos de hidrógeno, las soluciones acuosas se prepararon con agua doblemente desionizada, se aplicó ácido perclórico al 60%, se usó hidróxido de sodio con el fin de ajustar el pH a 3. Por otra parte, se utilizó ácido sulfúrico al 90% y 91% y por último se empleó oxisulfato de titanio al 1,9% -2,1%. Con relación a las celdas electrolíticas, se emplearon dos celdas electroquímicas para la producción de peróxido de hidrogeno y otra para la generación de clorato mediante una celda de flujo continuo y una creación presurizada que abarcaron un área total de $49,5\text{ cm}^2$. Los electrodos se encontraron a una distancia de $150\ \mu$ metro en donde el ánodo estuvo compuesto por óxido metálico mixto y el cátodo por politetrafluoroetileno con una densidad de corriente de 5.0 Ma/cm y la solubilidad de oxígeno se llevó a cabo a partir de una presión barométrica de 2,0 bar un volumen de 2,5 l a un tiempo de

electrólisis de 10 h .

Mientras que la producción de electroquímica de cloratos se empleó mediante una celda de flujo paralelo, con un espacio de electrodos de 9 mm, cuyo ánodo estaba fabricado a partir de óxido metálico mixto y el cátodo por acero inoxidable, el área total comprendo un total de 78 cm². El volumen tratado fue de 0,25 L y el tiempo de electrólisis fue de 5 h.

Una vez obtenidas las soluciones a partir del sistema ya antes mencionado se procedió a mezclar ambos compuestos en cantidades diferentes en donde en un primer experimento se tomó 13 ml de peróxido de hidrógeno, un ml de clorato y 25 ml de ácido sulfúrico a una temperatura de 68 °C, mientras que en el segundo experimento se utilizó 10 ml de clorato, 13 ml de peróxido de hidrógeno y 25 ml de ácido sulfúrico a la misma temperatura. Dando como resultado que en el primer experimento la concentración de cloro aumentara hasta un máximo de 2,47 mmol significando que el clorato disminuyera de 259.0 a 31 mg l alcanzando una conversión máxima de 89,65%. Mientras que, en el segundo experimento la concentración de dióxido de cloro aumento estabilizándose a un valor menor al del primer experimento, ya que produjo 0.86 mmol L, lo que represento una conversión solo de 26,70%. Este fenómeno se presentó a razón de que la segunda reacción contó con un exceso relevante de clorato en el sistema, mientras que el primero solo presento una ligera elevación.

Las conclusiones de los autores determinaron que, a pesar de que el peróxido de hidrógeno y clorato se pueden producir de manera eficiente mediante el proceso de electrólisis, el proceso llevado a cabo con soluciones comerciales puede llegar a ser mucho más rápido y menos dispendioso al ser una reacción altamente reproducible.

5. ASPECTOS TÉCNICOS DE LA PRODUCCIÓN DE CLORO LIBRE

Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica antes expuesta, fue posible identificar las variables que afectan el proceso de obtención de cloro en sitio, tanto en escenarios controlados a partir de disoluciones de NaCl como en aquellos que son efectuados con agua de mar. A continuación, se realizará una evaluación de las diferentes condiciones empleadas en cada una de estas variables.

5.1 pH

Considerando que el pH es una unidad de medida que permite diferenciar e indicar la acidez o alcalinidad en función de la concentración de iones de hidrógeno presentes en una sustancia que, en el caso de las soluciones ácidas libera el ion H^+ y en el caso de las soluciones básicas libera el ion Oxhidrilo, OH^- (Cruz, 2018). Fue posible evidenciar, a partir de las múltiples investigaciones revisadas, que esta variable es fundamental para llevar a cabo la obtención de hipoclorito mediante el proceso de electrólisis, ya que, al aplicar corriente continua a través de electrodos a una disolución, el electrodo conectado al polo positivo tiene la capacidad de atraer aniones negativos denominados ánodos, y aquel conectado al polo negativo atrae aquellos iones de carga positiva denominados cátodos que, al suministrar una energía adecuada produce una transferencia de electrones. Por consiguiente, los aniones ceden electrones al ánodo y los aniones positivos toman electrones del cátodo produciendo nuevas sustancias, a razón del desprendimiento o disociación del oxígeno e hidrogeno y demás componentes presentes como el cloro o la sal que generan un producto tanto básicos como ácidos (López Ojeda, Gutiérrez Lara, & Duran Moreno, 2015). Siguiendo el razonamiento anterior, algunos autores como (Baydum & Sarubb, 2022) en su investigación denominada “*Factibilidad de producir hipoclorito de sodio para fines de desinfección utilizando salmuera de desalinización*” realizaron diferentes ensayos en los cuales compararon la eficiencia de generación de cloro residual con base a la variación de condiciones como el pH, el cual, fue propuesto a una escala de acidez en un primer momento de 5,5, 6,5,6,7 y en un segundo momento a unos valores de 7,0 y 6,9 que demostraron que a un pH alrededor de 7,0, mayor es la eficiencia de producción de hipoclorito, puesto que, se logró producir 4.350 mg/L mientras que a un pH de 5,5 hubo una producción de 1.950 mg/l. De igual forma autores como (Mahammadi & Ebadi, 2021) afirman que cuanto mayor sea pH, de la disolución menor será la presencia de Cl como gas soluble y la mayor parte de cloro contenido disponible se encontrará de

forma de HOCl y OCl, mientras que al disminuir el pH el Cl tiende a oxidarse demasiado rápido como gas, disminuyendo así el cloro residual en el medio acuoso. Por otra parte, la investigación denominada “*Desarrollo de antisépticos a base de cloro por electrólisis*” llevada a cabo por los autores (Khaldoon & Hobro, 2020) demostró que para garantizar una generación óptima de HOCl es necesario adicionar un ácido débil antes o después del proceso de electrólisis, puesto que si la disolución cuenta con un pH superior 5,5 inicia la formación de NaOCl, por lo que si se quiere la formación del 90% de HOCl, es aconsejable emplear un pH que sea igual o menor de 6.5.

Por otra parte, existen diversos procesos que permiten la obtención de cloro en sitio a partir de procesos diferentes al de la electrólisis, como lo es la investigación denominada; “*Desalinización mediante tecnologías de membrana como alternativa frente a problemas de escasez de agua dulce*”. En la cual, se expone, la posibilidad de aplicar el método de osmosis inversa a través de membranas compuestas por acetato de celulosa que posibilitan el proceso de hidrólisis a un pH menor a 3 o superior a 8, con temperaturas menores a 30 °C, generando la degradación biológica y concentraciones de cloro libre por encima a 1,0 mg Cl₂.l que refuerza la inhibición de microorganismos patógenos (Grueso, Castro, Correa, & Sadagama, 2019).

Teniendo en cuenta la información antes expuesta se logra determinar que el pH, es un factor crítico a la hora de llevar a cabo el proceso de electrólisis, puesto que, de acuerdo a los estudios llevados a cabo por los investigadores, se percibe que los resultados llegaron a la conclusión; de que el rango óptimo para la estabilidad y mayor eficiencia del sistema se debe encontrar entre niveles que partan de 5,5 a un máximo de 7. Ya que, si se emplea un nivel menor al antes mencionado, la partícula de cloro que realizo el proceso de desprendimiento del compuesto, tendera a oxidarse con gran velocidad, pasando a un estado gaseoso y disminuyendo la presencia de HOCl en el líquido. Mientras que, si se emplea un pH mayor a 7, el proceso igualmente disminuirá su eficiencia al requerir un tiempo mayor en formarse el ácido. Debido a que la cantidad de hidróxido de sodio disuelta aumentara el pH de la solución, demorando así la reacción fisicoquímica que da paso al Hipoclorito.

5.2 Propiedades eléctricas

En vista de que el fenómeno de electrólisis está asociado a la intensidad de corriente (A) que se traslada mediante un material conductor a partir de una diferencia potencial (V) en un tiempo determinado (Gallegos, Carrasco, & Camurri, 2012), es fundamental, evaluar las variables que afectan de manera directa o indirectamente la conductividad que permite generar la disociación del ion cloro del compuesto NaCl.

Continuando con lo expuesto anteriormente, la corriente eléctrica está precisada por el flujo de carga eléctrica que pasa por un material conductor. El cual, a su vez, debe contar con una baja resistividad que permite mejorar la conductividad a una temperatura determinada, ya que a mayor temperatura, mayor resistividad y menor conductividad (Pozueta, 2015). Por lo que, las variables tales como intensidad y tiempo tienen la capacidad de afectar directamente en el proceso al aumentar o disminuir en el sistema acorde a lo mencionado anteriormente.

En función a lo descrito, un gran número de investigaciones han variado estas propiedades que se encuentran correlacionadas, con el fin de hallar una mayor eficiencia en la producción de hipoclorito. Tal como es el caso de la investigación titulada *“Efectos de las condiciones del proceso sobre la generación de cloro y la estabilidad de almacenamiento del agua electrolizada del océano profundo”* en la cual, los autores plantearon diferentes estudios variando en cada uno los parámetros empleados dentro del proceso, obteniendo como resultado que el agua de mar adquirida a 662 m debajo del océano pacífico a 5 km de distancia de la costa, tiene una mayor eficiencia al estar dentro de una celda compuesta por una malla de titanio platinado que cumple la función de ánodo y una malla de titanio como cátodo cuyas características estuvieron dadas por un ancho de 25 mm, una distancia de 6,7 mm, un potencial de celda de 10.0 V a una corriente de 8.7 A y una densidad de corriente de 28.9 A/dm². Adicional a lo anterior, el sistema se mantuvo a una temperatura de alrededor de 28 °C durante las 2 horas en las cuales se llevó a cabo la electrólisis, efectuando una concentración de cloro de 9.027 g Cl₂/L. Cabe resaltar que en dicha investigación se plantearon escenarios en los cuales el electrodo del ánodo, no se encontraba recubierto por platino lo que produjo una baja producción de cloro al ser el titanio un no tan buen conductor eléctrico. Por otra parte, a pesar de que aquellas pruebas realizadas con agua de mar superficial o soluciones de NaCl presentan resultados óptimos de producción de cloro, aquellas

pruebas realizadas de agua profunda superan esta eficiencia 2 veces (Guoo, Chin, & Shun, 2015).

Otras investigaciones como la realizada por los autores (Guoo, Wang, Yi, & Shun, 2017) se enfocaron en analizar los posibles efectos que pueden conllevar el tiempo de electrólisis y el potencial eléctrico en la generación de cloro, con las mismas muestras de agua obtenidas del océano profundo descritas anteriormente. En esta oportunidad, los científicos variaron el tiempo de electrólisis entre un rango de 180 minutos a 420 minutos con un voltaje entre 6.0 a 10,0 y, al igual que el anterior estudio emplearon una celda de electrólisis con un ánodo y cátodo de titanio recubierto por platino a una distancia 6,7 mm. A partir de las condiciones ya referidas, los científicos determinaron que; la concentración de cloro alcanza una generación máxima de 10.498 mg Cl₂/L cuando se manejó un voltaje de 7.5 durante 342 minutos. Puesto que, de acuerdo a lo expuesto en la investigación; al ser el potencial eléctrico la principal fuerza motriz del sistema, cuanto mayor sea el potencial de la celda, mayor será la cantidad de corriente y por ende, mayor será la densidad. Sin embargo, en esta oportunidad, los resultados indicaron que las concentraciones de cloro aumentaron significativamente con el tiempo a bajo potencial eléctrico, mientras que disminuyeron en el tiempo a un alto potencial de 8.5 V a 10 V. Por otra parte, establecieron que al alcanzar la generación máxima de cloro a un tiempo y un voltaje determinado este tendía a disminuir si se seguía en el proceso de electrólisis.

Por otra parte, se han desarrollado estudios en los cuales no se han utilizado muestras de agua natural para llevar a cabo el proceso de generación de cloro a partir de electrólisis, sino que, se han empleado muestras de agua preparada con diferentes compuestos que han permitido evaluar de igual forma la eficiencia de producción en función de diferentes disoluciones. Este es el caso de la investigación realizada por los autores (Francois, Patrick, & Gortares, 2017), denominada “*Optimización estadística de la producción de cloro activo a partir de un efluente salino sintético por electrólisis*” en la cual, se examinó la posibilidad de no solo variar condiciones tales como la intensidad eléctrica, densidad de corriente o tiempo de exposición, sino también, otros parámetros de reacción que involucraron concentraciones de H₃O, junto NaCl. Para llevar a cabo dicho proceso, los investigadores prepararon un efluente salino sintético a una concentración de 0.05 M y 0, 105 M, con 0,11 de H₃O. La celda electrolítica estuvo compuesta por su parte de una fuente de alimentación, un difusor de aire, un ánodo rectangular de material de Titanio recubierto por Iridio y una placa rectangular de acero inoxidable que fue usada como cátodo con el fin de

disminuir la oxidación del agua y permitir, que la oxidación de los iones de cloruro se presentara primero en el extremo del ánodo, dando como resultado que, de las 16 muestras estudiadas la que presento mayor eficiencia fue la solución a la cual se le aplicó una intensidad de 1.6 A con un consumo energético de 0.539 Kwh/m³, en un tiempo de 27 minutos, con una concentración de cloruro de 0.8 M y una concentración de 0.11 H₂O, dando como resultado una concentración de 30.6 mg Cl₂/l que presento una proporcionalidad con la conductividad, concluyendo que el tiempo y la intensidad de corriente son los factores determinantes que representan el 82,8% de eficiencia sobre las demás variables.

Mientras que, autores como (Khaldoon & Hobro, 2020), realizaron diferentes pruebas a concentraciones distintas de NaCl. La primera de ellas se efectúa utilizando una fuente de alimentación que contaba con un ánodo y cátodo de carbono de 33 mm de longitud y 12 mm de ancho que entraba en contacto con una solución salina al 0.9% de NaCl, a rangos de intensidad de corriente que oscilaron entre 1 a 20 A con 100 V. La segunda prueba, por otra parte, empleo electrodos MOX, y, en esta ocasión, el agua fue altamente purificada y dosificada con diferentes concentraciones de sal, para luego ser calentada a temperaturas de 36 °C a 37 °C a rangos de intensidad de corriente eléctrica que iban de 1 a 9 A. Por último, se usó agua proveniente directamente del grifo a diferentes concentraciones de NaCl a rangos de intensidad de corriente iguales que los utilizados en la segunda prueba. Para la primera prueba se obtuvo que, las concentraciones más altas, estaban dadas a una corriente eléctrica de 20 A, sin embargo, se logró visualizar residuos de carbono dentro de la solución electrolizada. Por lo que el uso del carbono como electrodo no es una opción viable al tener un alto grado de corrosión. La segunda prueba al variarle la temperatura indica, que existe una proporcionalidad con la generación de cloro. Puesto que al aumentarla a 36 °C- 37°C igualmente mayores eran los rangos de producción. Ya que, a concentración de 9.000 mg/l de NaCl en la disolución con una corriente de 9.7 A una potencia de 4.5V se generó una concentración de 1.130 ppm (1.130 mg/l) de cloro. Por último, la tercera prueba al ser sometida a condiciones similares de operación a la anterior, presento una generación total 1000 ppm (1000 mg/l) de hipoclorito teniendo como disolución inicial 9.000 mg/L de NaCl, 9 A, 5 V con una temperatura de 19°C a 20°C.

Además de las anteriores investigaciones, se han desarrollo estudios enfocados principalmente en el sistema electrolítico para la producción de hipoclorito. En donde científicos como (Neodo & Battisti, 2012) han analizado soluciones acuosas expuestas a electrodos de titanio recubierto por

dióxido de rutenio y titanio recubierto por plata, a tiempos, densidades de corriente y temperaturas diferentes. Estos procesos se efectuaron en soluciones de NaCl de 4 g. l. El primer estudio, se basó en usar el electrodo de titanio recubierto por dióxido de rutenio como ánodo el cual, se ubicó en medio de dos cátodos compuestos por placas de titanio a una distancia de 1 cm, en donde cada electrón contó con un área 100 cm^2 . Durante el desarrollo del experimento se agitó y se mantuvo la temperatura del sistema a $10 \text{ }^\circ\text{C}$, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ o $65 \text{ }^\circ\text{C}$ progresivamente y una densidad de corriente que iba de 250 A m^{-2} , 750 A m^{-2} a 1500 A m^{-2} , cada prueba tuvo duración de 180 minutos. Dando como resultado que a la temperatura de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ y a tiempos de exposición de 120 minutos aproximadamente, existen la generación de concentración de hipoclorito más alta en los tres estudios con densidades de 250 A m^{-2} , 750 A m^{-2} a 1500 A m^{-2} respectivamente, sin embargo, la mayor generación se produce al aplicar estas condiciones con una densidad de corriente de 1500 A m^{-2} , puesto que se obtienen concentraciones de 35 mmol/l . Mientras que, al emplear la placa de titanio recubierta por platino se obtuvieron resultados menos favorables, ya que, a pesar de que el comportamiento de generación de hipoclorito es mayor cuando existe una temperatura de $10 \text{ }^\circ\text{C}$, el tiempo de exposición si depende de la densidad de corriente aplicada, donde a 750 A m^{-2} se hallaron los mejores resultados de concentración que alcanzaron valores de 11 mmol/l .

Otro estudio que identifica que las variables intervienen en la eficiencia de generación de hipoclorito, está dado por aquel llevado a cabo por los autores (Bogoslovskii, Kuznetsov, & Boldyrev, 2017) quienes a partir de su investigación, emplearon parámetros de electrocloración que consistieron en; aplicar una densidad de corriente de $0,1 \text{ A/cm}^2$ a un volumen de 11 l, contenido en una celda que contaba con una concentración de cloruro de 25 g/l y 35 g/l por medio de un ánodo y cátodo de titanio recubierto por óxido de rutenio de 60 cm^2 a una temperatura inicial de $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Puesto que, de acuerdo a lo descrito en la investigación el rutenio es un metal que es favorable usarlo a temperaturas no menores de $18 \text{ }^\circ\text{C}$. El estudio al igual que algunos antes mencionados se realizó con base a una disolución preparada, que permite identificar a que concentraciones de cloruro es factible una mejor producción de hipoclorito. El caudal que se manejó fue de 0.8 l a 6.0 l . En función a las variables antes mencionadas, se determinó que, cuanto menor era el caudal mayor era la temperatura, lo que ocasiona que se produjera con mayor rapidez el cloro en forma de gas lo que disminuye la generación de hipoclorito. Sin embargo, existe una dependencia a la temperatura que se denota a través del tiempo, en donde al emplear una concentración inicial de 25 g/l de cloruro cuando existe un tiempo de exposición de 17.5 minutos a una temperatura de 22

°C se generan los índices más altos de producción correspondientes a 8.5 g/l de hipoclorito. Mientras que, a pesar de que al emplear una concentración inicial de 35 g/l de cloruro existe una dependencia igual que es dada al aumentar la temperatura, para llegar a producir 8.5 g/l de hipoclorito es necesario exponer la muestra a un tiempo de electrólisis de 24 minutos.

Si bien la electrólisis como método permite la desinfección de agua a partir de la producción de hipoclorito, de acuerdo a la revisión documental realizada; este proceso requiere parámetros de operación que dependen de etapas de diseño que correlacionan variables indispensables para el desarrollo del sistema denominado celda electrolítica. Entre estas variables se encuentran; electrolito, pH, temperatura, intensidad de corriente eléctrica, potencial eléctrico, densidad eléctrica, tiempo de exposición y tipo de electrodos (ánodo y cátodo), los cuales, permiten una transferencia de electrones que separan los elementos de los compuestos dando paso a una nueva sustancia, en donde se propicia una reacción de oxidación en el ánodo y una reacción de reducción en el cátodo transfiriendo iones entre sí (Alvarado & Avalos, 2013). Sin embargo, para lograr dicho proceso, es fundamental que esta transformación se dé a partir de una sustancia que contenga iones libres, en este caso los investigadores partieron de una solución acuosa salinizada proveniente de agua de mar o preparada a distintas concentraciones. En la cual, emplearon diferentes tipos de electrodos con base a sus características de conductividad, resistividad, capacidad térmica, conductancia entre otros, que al ser sometido a una carga eléctrica en un área determinada y en una unidad de tiempo, influyen en la eficiencia durante el proceso de producción de hipoclorito. Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, gran parte de los autores expuestos usaron como electrodo el titanio que cumple la función de ánodo y cátodo. Fenómeno que es dado gracias a que este presenta una conductividad alta de calor y de electricidad cuya resistividad es baja, comparado con otro tipo de materiales como el carbono, el cual, de acuerdo a los autores (Khaldoon & Hobro, 2020), durante el proceso existe residuos de esta materia en el agua electrolizada. No obstante a pesar de que las características del titanio son favorables para llevar a cabo dicha técnica, muchos investigadores como lo son (Francois, Patrick, & Gortares, 2017) (Khaldoon & Hobro, 2020) o (Bogoslovskii, Kuznetsov, & Boldyrev, 2017) han utilizado diferentes tipos de revestimientos que han permitido disminuir la actividad electrocatalítica, previniendo la formación de cloro durante la producción de hipoclorito (Lin, Marin, Adria, Zhiguo, & Pikaar, 2016). Otra condición dada dentro de las investigaciones es la distancia existente dentro de los electrodos donde autores como (Moratalla, Moteiro, Unez, Dos Santos, & Rodrigo, 2022) emplearon una distancia cercana de

0.015 cm o (Neodo & Battisti, 2012) que los situaron a 1 cm. Sin embargo, de acuerdo a lo hallado por los autores (Wnag & Yao, 2017) en su investigación titulada “*Efectos de la distancia entre electrodos y la corriente eléctrica en la generación de cloro en agua profundas electrolizadas*” la distancia empleada no resulta ser influyente en la producción de hipoclorito, siempre y cuando la diferencia de potencial de corriente (V), y la intensidad de corriente (A) igualmente se aumenten ya que, al trabajar el sistema electrolítico bajo una corriente continua, estas variables viajan hacia el mismo sentido o dirección lo que al mismo tiempo hace que se aumente la densidad de corriente, que no es más sino “la intensidad de corriente que pasa por el sistema por unidad de área de electrodo” (Beltrán & Lissteh, 2017). Por lo anterior, se logró concluir que, a mayor intensidad de corriente igualmente mayor en la producción de hipoclorito dando evidencia de la primera ley de Faraday, la cual indica que “La masa M de sustancia que se desprende en el electrodo es directamente proporcional a la carga eléctrica que pasa por el electrolito en un tiempo determinada (Desmore, 2016)”. Es así como, los resultados obtenidos de las investigaciones revisadas demuestran que, el sistema al cual se le aplicó mayor intensidad de corriente es aquel que tiene índices más favorables de producción al arrojar una concentración total de 1.130 mg/L de hipoclorito con una intensidad de 9.7 A mientras que los demás estudios emplearon valores de 1.6 A, 7.5 A, 8,7 A entre otros. Ahora si bien esta es una de las variables que más influyen en el proceso de generación, no es la única que afecta en el sistema, ya que, los autores (Khaldoon & Hobro, 2020) quienes obtuvieron esta concentración, analizaron que al aumentar la temperatura a 36 °C- 37 °C en un tiempo determinado igualmente aumentaba el rendimiento de producción. Asimismo, se identificó que el área de los electrodos fue fundamental para la ejecución de cada uno de los experimentos realizados, puesto que, aquellos que emplearon una intensidad mayor también contaron con un área mucho más considerable. Esto se debió a que al aumentar la intensidad mayor cantidad de electrones viajan por la superficie conductora lo que incrementa la temperatura en la celda electrolítica (Beltrán & Lissteh, 2017).

Por otro lado, las disoluciones empleadas como electrolito también cumplen un papel fundamental en la electrólisis, ya que, si se quiere obtener hipoclorito o cloro libre, éstas deben contar con iones que sean óptimos conductores de electricidad. Principalmente con iones de cloruro y sodio. No obstante, a pesar de que gran parte de las investigaciones encontradas emplearon agua de mar como disolución, otras por su parte, manejaron muestras preparadas que consideraron diferentes concentraciones y compuestos que resultaron con propiedades electrolíticas mucho más eficientes

en comparación. Este es el caso de la investigación titulada “Optimización estadística de la producción de cloro activo a partir de un efluente salino sintético por electrólisis” en la cual, a concentraciones de 0.8 M de sal sintética y una concentración de 0.11 H₃O, se obtuvo como resultado una concentración de 30.6 mg Cl₂/l (Khaldoon & Hobro, 2020), o la investigación titulada “Developing chlorine-based antiseptic by electrolysis” la cual tuvo como se mencionó anteriormente un resultado de 1.130 mg/L de hipoclorito a partir de una disolución inicial 9.000 mg/L de NaCl. Esta última investigación por su parte empleo diferentes disoluciones de NaCl a diferentes concentraciones, encontrando como las más eficiente la mencionada anteriormente. Mientras que aquellas, como la investigación titulada “*Efectos de las condiciones del proceso sobre la generación de cloro y la estabilidad de almacenamiento del agua electrolizada del océano profundo*” emplearon agua de mar la cual, no solo contenía concentraciones de cloruro y sodio sino también de magnesio, calcio y potasio, que pueden resultar desfavorable en los resultados de la investigación, al generar sustancias indeseadas. Finalmente, se efectuó una concentración de cloro de 9.027 g Cl₂/l.

A partir de lo hallado anteriormente, podemos concluir, que cada proceso de electrólisis comprende diferentes concentraciones y eficiencias que brindan resultados más, o menos óptimos. Ya que, al encontrarse las variables correlacionadas directamente, es fundamental analizar técnicamente el diseño a emplear como sistema. Es, así pues, como se determina que, a pesar de que algunos científicos asocian mayor electricidad con mayor producción, lo cierto es que los resultados estudiados demuestran que, si se emplea una potencia no mayor a 8 V y una corriente eléctrica que no supere los 10 A, a en un tiempo de exposición considerable que supere los 180 minutos. Es altamente probable, que los resultados de producción sean mucho más favorables. Sin embargo, hay otras variables fundamentales en el proceso, como lo es la temperatura; la cual, de acuerdo a lo observado, funciona como un agente catalizador que a rangos de 33 °C a 36 °C tiene la capacidad de acelerar el proceso. Por otra parte, si bien existen diferentes metales que pueden llegar a ser utilizados como electrodos, el titanio es el más empleado para dicho proceso. Puesto sus características de resistividad, permiten, una amplia exposición de altas corrientes en largos periodos de tiempo, sin formar ningún tipo de residuo que pueda llegar afectar la muestra. No obstante, es preciso adicionar algún tipo de recubrimiento como lo es el rutenio, para aumentar la conductividad en el sistema, ya que, si bien el titanio es un material altamente resistente, tiene características de baja conductividad.

Finalmente, la producción de hipoclorito dependerá principalmente de las concentraciones existentes de NaCl en la disolución, las cuales, variaron de acuerdo al tipo de estudio realizado. Permitiendo identificar que, a mayor concentración de este compuesto, mayor será la producción de hipoclorito.

6. EFICIENCIA DE INHIBICIÓN DE MICROORGANISMOS CON HIPOCLORITO A PARTIR DE ELECTRÓLISIS

La desinfección de agua es un proceso que permite eliminar diferentes tipos de microorganismos que presentan una incidencia negativa sobre la salud humana, al beber agua sin realizar ningún tipo de proceso sanitario (Ruiz, 2017). Por esta razón, se han desarrollado algunas tecnologías que han minimizado el riesgo a partir de la eliminación de patógenos como lo son los virus, bacterias y protozoos que se encuentran presentes en ciertas fuentes naturales de agua.

Tomando en cuenta lo descrito anteriormente, para el desarrollo de aquellas tecnologías se han empleados métodos químicos; los cuales se basan principalmente en sustancias con actividad antibacteriana y antiviral que actúan en un determinado tiempo de contacto. Y, métodos físicos o mecánicos; que son aquellos referentes al calor o luz, en donde, la temperatura, la radiación ultravioleta, plasma frío entre otras, son técnicas eficientes que obtienen óptimos resultados (Guimaraes, Ibañez, Liter, & Pizarro, 2021). No obstante, el método más utilizado para llevar a cabo dicho proceso es el método químico, a partir de agentes desinfectantes como el cloro y sus derivados, bromo, yodo, el ozono, alcohol, los compuestos amoniacales cuaternarios entre otros que dado su bajo costo y fácil acceso proporcionan una rápida y factible desinfección.

Ahora bien, si es cierto que existe una gran variedad de líquidos aptos para la inhibición de microorganismos, el ion hipoclorito tiene la capacidad de causar alteraciones físicas y químicas que destruyen la capa protectora y da lugar a la muerte de los patógenos, concediendo de esta manera una eficiencia de alrededor del 95% al 100% dependiendo de su aplicación y concentración (Peira, 2015). Por consiguiente, el proceso de electrólisis como método de obtención de hipoclorito brinda una oportunidad rápida y eficaz de conseguir una desinfección óptima de agua para su consumo o uso, a partir de fuentes naturales que se encuentran presente principalmente en zonas costeras en las cuales abunda agua de mar con una gran variedad de minerales en especial Na^+ y iones Cl^- que al ser sometidas a esta reacción no espontánea genera hipoclorito como nuevo compuesto. Es así pues, como diferentes investigaciones han demostrado la capacidad de inhibición del hipoclorito resultante de este proceso electroquímico para diferentes microorganismos, como lo es la investigación realizada por (Ziemba & Morgenroth, 2019) quienes con base a su estudio titulado “Comparación del rendimiento antibacteriano de los postratamientos

de cloración y electrólisis en un sistema de reciclaje de agua para lavarse las manos” analizaron la capacidad de inactivación e inhibición de microorganismos patógenos, a partir de la aplicación de cloro directo y de cloro libre producido por medio de la electrólisis, obteniendo como resultado una disminución importante. Ya que, al empezar el tiempo de desinfección, el agua proveniente de actividades domésticas reportaba un total de células de $5,6 \times 10^5$ UFC/ml a las cuales, una vez iniciado el ensayo se les suministraron diferentes concentraciones iguales en ambos tratamientos con valores de 0,2, 5 y 10 mg/l que alcanzaron en el caso de la aplicación de cloro directo una reducción desde $9,0 \times 10^4$ UFC/ml, $2,8 \times 10^4$ UFC/ml hasta $1,6 \times 10^3$ UFC/ml, mientras que las concentraciones generadas por medio de la electrólisis alcanzaron una disminución desde $8,8 \times 10^4$ UFC/ml, $1,1 \times 10^4$ UFC/ml hasta $2,3 \times 10^3$ UFC/ml. Muy similares a aquellos valores proporcionados a partir de la cloración directa. Lo que permitió identificar, que, a mayor concentración, igualmente mayor era la reducción o inhibición de microorganismos. Cabe resaltar que este proceso de electrólisis se realizó durante 61 días en donde los primeros 47 fueron los días que presentaron mayores índices de producción de cloro libre.

Otras investigaciones como la realizada por (Chen & Zhao, 2020) titulada “Desempeño antibacteriano, control de subproductos de desinfección y estrategia de optimización en abastecimiento de agua potable distribuida mediante electrólisis” logró identificar una comparación del desempeño antibacteriano de la cloración directa y de la desinfección a partir del cloro libre generado por medio de electrólisis de agua cruda, la cual, paso por el proceso de electrólisis de flujo de un solo paso y la desinfección por cloración para su comparación. Inicialmente, el agua cruda contaba con recuentos de heterotróficos en placa que oscilaban entre $3,20 \times 10^4$ a $5,10 \times 10^4$ UFC/ml, una vez realizadas las pruebas piloto se obtuvieron valores de reducción de $3,70 \times 10^2$ UFC/ml a $3,30 \times 10^4$ UFC/ml a un tiempo de exposición de 30 minutos de electrólisis, y al aplicar cloro directamente se obtuvieron valores similares de 1×10^2 UFC/ml a 2×10^4 UFC/ml. Lo que indica que el proceso de electrólisis puede llegar a cumplir los estándares de calidad de higiene de agua potable, impartidos por la OMS, la EPA, la UE y China, quienes establecieron un valor menor de 500 UFC/ml. Para adquirir este resultado los científicos utilizaron una concentración inicial para ambos procesos de $0,22 \text{ Cl}_2\text{mg/l}$.

Mientras que investigaciones como, la llevada a cabo por los científicos (Girgin & Dimoglo, 2019)

determinaron como una disolución de NaCl electrolizada tiene la capacidad de inactivar a partir de daños celulares el patógeno *Enterococcus Faecalis*, degradando el 95,4% en un minuto, donde la actividad relativa de la enzima deshidrogenasa de E, *Faecalis* disminuyo 1,3% durante los primeros 30 segundos de contacto. Entre tanto, el biomarcador de estrés oxidativo denominado niveles Malondialdehyde (MDA) aumento una vez realizado el proceso de electrolisis un 0,38 Mm, lo que significa que existe una amplia oxidación de los lípidos del microorganismo que ocasionan la muerte de la célula bacteriana. Otros científicos por su parte lograron evaluar el “Efecto desinfectante y su mecanismo de agua oxidante electrolizada sobre esporas de *Bacillus subtilis* var (Wenwei, y otros, 2012)” en donde a pesar de que el conteo inicial de microorganismos correspondía a un valor de $1,26 \times 10^7$ UFC/ml se denotó una tasa fungicida óptima al eliminar el 100% en un tiempo de exposición de 20 minutos a una concentración de 191 mg/L de cloro libre disponible. Cabe resaltar, que estas esporas son las biounidades más resistentes al tener una estructura con pared exterior gruesa y densa que evita la muerte instantánea del microorganismo, por tanto, es necesario una concentración alta y un pH bajo para lograr su inhibición (Kovács, 2019). Además de eliminar el patógeno mencionado anteriormente, los científicos (Liu, y otros, 2021) han demostrado que tiene igualmente una eficaz acción de inactividad en las *Pseudomonas deceptionensis* CM2, las cuales, de acuerdo a los resultados hallados, el agua electrolizada cuenta con un potencial de reducción de hasta $5,14 \log_{10}$ CFU/ml durante un tiempo de exposición de 60 minutos a una concentración de cloro libre de 64 mg/l en una muestra que inicialmente poseía valores de $10,2 \log_{10}$ de estos microorganismos, mientras que los *Staphylococcus. Aureus*, fueron inactivados por $3,73 \log_{10}$ CFU/ml. Por otra parte, al ser la bacteria *Escherichia coli* un indicador microbiológico de contaminación en aguas potables, la autora (González L. A., 2018) a partir de su investigación, demostró que la eficacia de inhibición del agua electroactiva alcanza un porcentaje del 100% de eliminación, al emplear tiempos de exposición que oscilaban entre los 15 a 60 minutos en función de concentraciones de 1 ppm, 10 ppm, 80 ppm y 100 ppm de hipoclorito de sodio. Donde si bien no con todas las concentraciones se obtuvieron eficiencias óptimas del 100%, al emplear las concentraciones más altas de 80 ppm y 100 ppm se consiguió una inhibición total en cada uno de estos tiempos.

Tal y como se ha comprobado, el hipoclorito originado de procesos de electrólisis brinda una posibilidad de mitigación ante el brote de diferentes enfermedades epidémicas que amenazan la

salud y bienestar del ser humana, al consumir agua o alimentos gestionados de manera inapropiada que contienen un alto índice microbiano que no es eliminado. De manera que, el hipoclorito como sustancia oxidante permite la destrucción de gran variedad de patógenos gracias a su capacidad de acción germicida, asegurando una desinfección eficaz mediante un proceso mucho más respetuoso con el medio ambiente.

7. ASPECTOS AMBIENTALES ÓPTIMOS PARA LA PRODUCCIÓN DE CLORO

Considerando que el acceso de agua potable en una de las problemáticas más complejas por las que actualmente atraviesan una gran variedad de comunidades principalmente rurales y costeras, la electrólisis se presenta como una alternativa viable ante la crisis tanto social como sanitaria que este tipo de situaciones conllevan. Ya que, siendo el Océano la fuente hídrica que ocupa el 71% del área cubierta en la tierra (Secretaría Ejecutiva Comisión Colombiana del Océano, 2013) es posible garantizar el suministro de este recurso a aquellas poblaciones circundantes que carecen de cualquier tipo de abastecimiento. De manera que investigaciones como “Aspectos críticos en el desarrollo de ánodos para uso en electrólisis de agua de mar” (Mari, y otros, 2022) ha destacado el progreso de la electrolisis en zonas costeras, debido principalmente a las características del agua proveniente del mar asociadas a continuación.

Tabla 6.

Composición del agua de mar

Elemento	Rango de concentración (ppm)	Especies químicas disueltas
cl	19 500–22 000	Cl^-
N / A	10,770–14039	Na^+
magnesio	1290-1490	$Mg^{2+}, MgSO_4, MgCO_3$
S	905–3200	$SO_4^{2-}, NaSO_4^+$
California	378–421	Ca^{2+}
k	380–469	K^+
hermano	67	Br^-
C	28	$HCO_3^-, CO_3^{2-}, CO_2 gas$
norte	11.5	$N_2 gas, NO_3^-, NH_4^+$

Nota. La anterior tabla muestra los elementos presentes en el agua de mar empleada durante el experimento. Mari, M., Delplancke, J., Cisternas, N., Tobosque, P., Maril, Y., & Carrasco, C. (2022). Aspectos críticos en el desarrollo de ánodos para uso en electrólisis de agua de mar. *Revista internacional de energía de hidrógeno*, 3532-3549. Obtenido de <https://www-sciencedirect-com.hemeroteca.lasalle.edu.co/science/article/pii/S0360319921043834>

Sin embargo, a pesar de las características generales expuestas anteriormente, existen factores que pueden incrementar o disminuir estos valores, puesto que el principal elemento que se busca en el momento de realizar el proceso de electrólisis es ion Cl^- y el ion Na^+ , mientras que los demás elementos podrían formar diferentes compuestos no deseados en el proceso. Igualmente, otros factores importantes a evaluar son los parámetros como los sólidos disueltos totales, el carbono orgánico total y la demanda biológica de oxígeno entre otros, que podrían incrementar significativamente los microorganismos psicofísicos presentes en el agua, provocando incrustaciones que afectan la eficiencia de la producción de cloro libre (Mari, y otros, 2022). Por lo anterior, otras investigaciones frente a estas dificultades han estudiado las formas de optimizar y mitigar estos aspectos, como la ya antes mencionada, titulada “Efectos de las condiciones del proceso sobre la generación de cloro y la estabilidad de almacenamiento del agua electrolizada del océano profundo” la cual demostró, que el agua tomada a profundidades de alrededor de 1.5 km, puede llegar a ser mucho más limpia, al encontrarse en un ambiente estable y menos expuesto a diferentes tipos de contaminaciones (Guoo, Chin, & Shun, 2015). Es así, como a continuación se expone la comparación realizada por los investigadores del agua superficial y el agua profunda, extraída de las costas ubicadas en Hualien, Taiwán.

Tabla 7.

Comparación de la composición de las muestras empleadas

		Agua de mar superficial	Agua profunda del océano
Composición	Nitrito (μM)	0,08 ~ 0,11	<0.03
	Clorofila a ($\mu\text{g/L}$)	0,12 ~ 0,19	<0.03
Propiedad	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	22,5 ~ 23,8	9,4 ~ 10,4
	pH	8.10 ~ 8.20	7,70 ~ 7,75
	Salinidad (psu)	34,2 ~ 34,5	34,3 ~ 35,0

Nota. Una comparación de las composiciones y propiedades del agua de mar superficial y las muestras de agua del océano profundo. Guoo, S., Chin, W., & Shun, Y. (2015). Efectos de las condiciones del proceso sobre la generación de cloro y la estabilidad de almacenamiento del agua electrolizada del océano profundo. Revista de análisis de alimentos y medicamentos, 23, 735-741. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1021949815000800>.

Justo como se observa en la anterior tabla, los índices de nitritos los cuales están asociados a

contaminantes procedentes de actividades de origen industrial, ganadero o urbano que generan materia orgánica en donde es mucho más probable una proliferación de microorganismos (Bolaños, Cordero, & Segura, 2017), presentan un índice de < 0.03 en el agua extraída a gran profundidad, mucho menor que lo encontrado en agua superficial, cuyo reporte de concentración fue de 0.08-0.11. El mismo fenómeno se presenta con el parámetro de la clorofila, la cual está vinculada a procesos de eutrofización que dan paso al crecimiento de microorganismos como las cianobacterias, que tiene la capacidad de afectar la salud humana. Por otro lado, otras investigaciones aprovechando no solo el recurso hídrico sino también solar, han planteado la posibilidad de incorporar este tipo de procesos en lugares en los cuales se dispone de luz y calor, sino es la totalidad del año, gran parte de este para la generación de electricidad. Tal es el caso de la investigación, realizada por los autores (Díaz & Rojas, 2019), quienes a partir de su estudio “Alternativa de tratamiento de agua salobre para el mejoramiento del suministro y calidad de agua potable en la ranchería de Jellusira del corregimiento de Musichi, en Manaure Guajira, Colombia” han comprobado la factibilidad de desarrollar el proceso de electrólisis a partir de este recurso solar, puesto que, de acuerdo a lo descrito por los mismos es posible a partir de paneles convertir la radiación solar en energía térmica, para luego ser almacenada en baterías y proporcionar la corriente continua que el sistema necesita. Por lo anterior, este tipo de tecnologías tienen la capacidad de adecuarse en condiciones ambientales complicadas las cuales dificultan la mayoría de los procesos de instalación de infraestructura o adecuamientos para el suministro de servicios tales como el de la energía o agua que son fundamentales para el desarrollo saludable de aspectos sociales y sanitarios de una comunidad. Por tanto, desarrollar la electrólisis en áreas costeras puede no solo optimizar costos, sino también brindar una solución realizable para aquellas comunidades vulnerables situadas en zonas de difícil acceso.

8. CONCLUSIONES

El país que presenta mayor cantidad de investigaciones con relación a la producción de cloro libre es China, el cual ha desarrollado 304 estudios que abordan diferentes temas relacionados con la desinfección por medio de electrólisis o desalinización de agua. Por otra parte, el científico o autor pionero de dichas investigaciones es Ren Zhen, quien ha participado en 45 de estas.

A pesar de ser una tecnología descubierta desde el año 1800, la mayor cantidad de estudios realizados fueron desarrollados durante el año 2021, en el cual se presentaron alrededor de 125 investigaciones sobre el tema. Lo que demuestra que aún existe ausencia documental que pueda soportar su implementación y aplicación.

Se concluye que las variables que interfieren durante el proceso de electrólisis están dadas por la intensidad de corriente, potencial eléctrico, densidad de corriente, tipo de ánodo y cátodo, tiempo, temperatura, electrolito y pH, variables que son codependientes y afectan directamente la eficiencia durante el proceso de producción de cloro en sitio.

De acuerdo con las investigaciones revisadas se logra concluir que el pH óptimo para realizar el proceso de electrólisis debe encontrarse en valores de 5.0 a 8.0 unidades a razón, del comportamiento de la reacción que presenta mayor eficiencia en este intervalo.

El electrodo que se encuentra más presente durante los estudios realizados es aquel compuesto por el material de titanio, el cual, de acuerdo a sus propiedades físicas, químicas y mecánicas manifiesta menores inconvenientes en el momento de emplear disoluciones con alta carga de aniónica o variaciones en las variables que involucran corriente eléctrica.

Todas las variables derivadas de la corriente están ligadas entre sí, por tanto, no existe un rango específico que determine la eficiencia en cualquier tipo de sistema.

Se identificó que, en los experimentos efectuados, la variable de la temperatura influyo de manera significativa en la producción y concentración final de cloro libre. Lo que permitió concluir que a mayor temperatura mejor era la eficiencia en un tiempo determinado, una vez alcanzado este pico

máximo, la eficiencia tendió a bajar en cada uno de los estudios.

A pesar de que la producción de cloro mediante electrólisis es una opción viable para aquellas poblaciones ubicadas en zonas costeras, es fundamental ampliar las investigaciones que puedan brindar mayor información con relación a los aspectos técnicos a aplicar para lograr una inhibición total de los posibles microorganismos presentes en el agua.

Si bien existe información con relación al agua procedente del proceso de electrólisis como desinfectante, no existen artículos de acceso abierto que relacionen la inhibición de 3 o más microorganismos patógenos presentes en el agua proveniente del mar. Por lo que, en esta monografía, aún no existe la certeza de que este proceso pueda implementarse totalmente como una fuente de abastecimiento confiable en la actualidad. Sin embargo, dados los avances realizados es probable que se logre poner en práctica con seguridad en un futuro cercano.

Se concluyó que las condiciones ambientales óptimas para llevar a cabo el proceso de electrólisis están dadas para aquellas zonas costeras que cuentan con un inagotable recurso solar y hídrico, permitiendo así una disminución en costos a partir de una estrategia que por otra parte es respetuosa con el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, J., & Avalos, L. (2013). Materiales para anodos, catodos y electrolitos utilizados en celdas de combustible de oxido s ´ oido (SOFC). *Revista Mexicana de Fisica* 59, 66-87. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmf/v59n1/v59n1a1.pdf>
- Baydum, V., & Sarubb, L. (2022). Factibilidad de producir hipoclorito de sodio para fines de desinfección utilizando salmuera de desalinización. Brasil: Scopus. Obtenido de [file:///C:/Users/Arq.%20Fonseca/Downloads/factibilidadart1monografia%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/Arq.%20Fonseca/Downloads/factibilidadart1monografia%20(3).pdf)
- Beltrán, N., & Lissteh, C. (2017). Determinación de la densidad de corriente y distancia entre electrodos óptimos para la producción de hidrógeno en un reactor tubular. Obtenido de <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3784/Beltran%20Beltran-Carmen%20Romero.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bogoslovskii, Y., Kuznetsov, N., & Boldyrev, V. (2017). Optimización de parámetros del proceso electrolítico de obtención de hipoclorito de sodio para desinfección de agua. *Journal of Physics: Conference Series*. Obtenido de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/918/1/012028/meta>
- Bolaños, J. D., Cordero, G., & Segura, G. (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable, como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *Tecnología en Marcha*. Obtenido de <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v30n4/0379-3982-tem-30-04-15.pdf>
- Cataldo, F., Arriagada, S., & Hernández, D. (2019). Pilas, una forma experimental de enseñanza de los procesos Redox. *Revista Unam*, 3. Obtenido de <http://www.revistas.unam.mx/index.php/req/article/view/68309/61819>
- Chen, X., & Zhao, X. (2020). Desempeño antibacteriano, control de subproductos de desinfección y estrategia de optimización en abastecimiento de agua potable distribuida mediante electrólisis. *Revista de producción más limpia*, 265. Obtenido de <https://www-sciencedirect-com.hemeroteca.lasalle.edu.co/science/article/pii/S0959652620318576>
- Cruz, G. G. (Abril de 2018). Una visión universitaria: el ph, sustento en el equilibrio químico para

la vida celular. Ciencia UAT, 2, 62. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/4419/441942912004.pdf>

Desmore, J. (2016). Study of the Laws of Faraday, Lenz and Fleming Estudio de las Leyes de Faraday, Lenz y Fleming. Academia Accelerating the world'sresearch. Obtenido de <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54923310/faraday-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1663200132&Signature=MQn-3A7dJJqOU6nzP9YPJMMpE0fnM9x4Apdg9Fb5iPkulla9e0kMlBHiM1wL1agQFhgWSFYBXreS2w5RBop29c1vbM4XNRcORzm4C3JewZ32khtGGquDcdWVHMaBzCpbYfs tYPDdeWRNtNPKDyG->

Díaz, V., & Rojas, A. (2019). Alternativa de tratamiento de agua salobre para el mejoramiento del suministro y calidad de agua potable en la ranchería de Jellusira del corregimiento de Musichi, en Manauare Guajira, Colombia. Obtenido de https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=2861&context=ing_ambiental_sanitaria

Fesenko, L., Pcheínikov, I., & Fedotov, R. (2017). Análisis de eficiencia económica de la producción de Hipoclorito de sodio de baja concentración por electrólisis directa de aguas naturales. Rostov: The Electrochemical Society. Obtenido de <file:///C:/Users/Arq.%20Fonseca/Downloads/Articulo%205.en.es.pdf>

Forero, G. A. (2018). Electrocoagulación para la desalinización del agua. Escuela Colombiana de Ingeniería, 95. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7390748.pdf>

Francois, Z., Patrick, D., & Gortares, P. (2017). Optimización estadística de la producción de cloro activo a partir de un efluente salino sintético por electrólisis. ELSEVIER, 16-23. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916412001890>

Gallegos, A., Carrasco, C., & Camurri, C. (2012). Estudio de variables principales para el establecimiento del régimen de plasma electrolítico a baja potencia. Universidad de Antioquia, 7-15. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n65/n65a01.pdf>

Garzón, L., Martínez, Y., & Carmen, A. (2014). Historia de la electroquímica en la formación

inicial de profesores, una experiencia investigativa. Santiago, Chile: BellaTerra.

Girgin, Z., & Dimoglo, A. (2019). Evaluación comparativa del mecanismo de desinfección de hipoclorito de sodio, dióxido de cloro y agua electroactivada en *Enterococcus faecalis*. *LWT*, 102, 205-213. Obtenido de <https://www-sciencedirect-com.hemeroteca.lasalle.edu.co/science/article/pii/S0023643818310995>

Gómez, Lucia Noval. (Julio de 2017). El cloro, producción e industria. Recuperado el 22 de Junio de 2022, de http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-Ciencias-CyTQ-Lnoval/Noval_Gomez_Lucia_TFM.pdf

González, L. (2021). Producción a nivel local de hipoclorito de sodio por electrolisis de la sal. Guatemala: Organización Mundial de la Salud. Obtenido de https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/54732/opsguthpe94.13_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y

González, L. A. (2018). Evaluación de la inhibición de *Escherichia coli* sp a partir del desinfectante obtenido por electrólisis de cloruro de sodio. Obtenido de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6970/1/6131982-2018-2-IQ.pdf>

Grueso, M., Castro, C., Correa, M., & Sadagama, J. (2019). Desalinización mediante tecnologías de membrana como alternativa frente al problema de escasez de agua dulce. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242019000200069&lang=es

Guimaraes, J., Ibañez, J., Liter, I., & Pizarro, R. (2021). Desinfección de agua. Obtenido de <https://www.psa.es/en/projects/solwater/files/CYTED01/22cap15.pdf>

Guoo, S., Chin, W., & Shun, Y. (2015). Efectos de las condiciones del proceso sobre la generación de cloro y la estabilidad de almacenamiento del agua electrolizada del océano profundo. *Revista de análisis de alimentos y medicamentos*, 23, 735-741. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1021949815000800>

- Guoo, S., Wang, H., Yi, F., & Shun, Y. (2017). Efectos del tiempo de electrólisis y el potencial eléctrico en la generación de cloro del agua electrolizada del océano profundo. *Journal of Food and Drug Analysis*, 759-765. Obtenido de <https://www-sciencedirect-com.hemeroteca.lasalle.edu.co/science/article/pii/S1021949816300904>
- Guoo-Shyng Wang Hsu, S.-Y. H. (2018). Efectos de la distancia entre electrodos y la corriente eléctrica en la generacion de cloro en aguas profundas electrolizadas del océano. . *FDA*, 6.
- Hernández, C. T. (2018). Obtención de un agente desinfectante a partir de la electrólisis de cloruro de sodio para el tratamiento de agua potable. Obtenido de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6717/1/6131990-2018-1-IQ.pdf>
- Ibarguen, M., & Bernal, L. (2012). Establecer la demanda de cloro en el acueducto tribunas córcega de la ciudad de pereira. Obtenido de <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/34c04e9f-b81a-4b48-a5e8-428a6c9800af/content>
- Isitan, C., Yan, Q., Spencer, D., & Alkawadri, R. (2020). Brief history of electrical cortical stimulation: A journey in time from Volta to Penfield. *ELSELVER*, 10. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920121120301364>
- Khaldoon, M., & Hobro, S. (2020). Developing chlorine-based antiseptic by electrolysis. *Science of The Totak Environment*, 709. Obtenido de <https://www-sciencedirect-com.hemeroteca.lasalle.edu.co/science/article/pii/S0048969719361042>
- Kovács, Á. (2019). *Bacillus subtilis*. *Trends in Microbiology*, 27, 8. Obtenido de <https://orbit.dtu.dk/en/publications/bacillus-subtilis>
- Lin, H., Marin, R., Adria, w. R., Zhiguo, Y., & Pikaar, L. (2016). Producción directa de ácido clorhídrico anódico y cáustica catódica durante la electrólisis del agua. *Informe científico* 6. Obtenido de <https://www.nature.com/articles/srep20494#citeas>
- Liu, X., Zhang, M., Meng, X., He, X., Zhao, W., Liu, Y., & He, Y. (2021). Mecanismo de inactivación y daño a la membrana del agua electrolizada ligeramente ácida en

Pseudomonas deceptionensis CM2. Moléculas. Obtenido de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7917946/>

López Ojeda, M., Gutiérrez Lara, R., & Duran Moreno, A. (2015). Efecto del ph sobre la oxidacion electroquimica de fenolemployando un anodo dimensionalmente estable de SnO. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14, 437-452. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/620/62041194020.pdf>

Mahammadi, S., & Ebadi, T. (2021). Production of a water disinfectant by membrane electrolysis of brine solution and evaluation of its quality change during the storage time. *Arabian Journal of Chemistry*, 102925. Obtenido de <https://www-sciencedirect-com.hemeroteca.lasalle.edu.co/science/article/pii/S187853522030486X>

Mari, M., Delplancke, J., Cisternas, N., Tobosque, P., Maril, Y., & Carrasco, C. (2022). Aspectos críticos en el desarrollo de ánodos para uso en electrólisis de agua de mar. *Revista internacional de energía de hidrógeno*, 3532-3549. Obtenido de <https://www-sciencedirect-com.hemeroteca.lasalle.edu.co/science/article/pii/S0360319921043834>

Moratalla, A., Moteiro, M., Unez, C., Dos Santos, E., & Rodrigo, M. (2022). Produccion electroquimica completa y sostenible de dióxido de cloro. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 4.

Neodo, S., & Battisti, A. (2012). Sobre la electrólisis de soluciones cloruradas diluidas: Influencia del material del electrodo en la eficiencia Faradaica para cloro activo, clorato y perclorato. *Electroquímica Acta*, 80, 282-291. Obtenido de <https://www-sciencedirect-com.hemeroteca.lasalle.edu.co/science/article/pii/S0013468612011334#!>

Otalora, T. A. (2008). El analisis bibliometrico como herramienta para el seguimiento de la publicaciones científicas, tesis y trabajo de grado. Bogotá. Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8212/tesis209.pdf>

Peira, A. G. (2015). Desarrollo de un sistema para la desinfección de agua de consumo mediante tratamiento electroquímico. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 19, 75. Obtenido de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-

48212015000200002&lang=es

Pérez, C. L. (2017). Enseñanza de la ley de inducción de Faraday con experimentos sencillos, materiales de bajo costo y de fácil consecución. Valledupar. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/64030/Ense%C3%B1anza%20de%20la%20ley%20de%20inducci%C3%B3n%20de%20Faraday%20con%20experimentos%20sencillos%2C%20materiales%20de%20bajo%20costo%20y%20de%20f%C3%A1cil%20consecuci%C3%B3n.pdf?sequence=1&is>

Pozueta, M. A. (2015). Aislantes y conductores utilizados en las máquinas eléctricas. España: Universidad de Cantabria. Obtenido de <https://personales.unican.es/rodrigma/pdfs/aislantes%20y%20conductores.pdf>

Ruiz, A. (2017). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Mexico: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Obtenido de <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro23.pdf>

Secretaría Ejecutiva Comisión Colombiana del Océano. (2013). El océano maravilla terrestre Bogotá. obtenido de https://cco.gov.co/docs/publicaciones/libro_oceano_maravilla_terrestre.pdf

Shadan, E., & Kiyoko, B. (2021). Cloro y cloro residual libre en los sistemas de cloración por goteo autocompensante en Jatumpata y Yananaco. Huancavelica. Obtenido de <http://repositorio.unh.edu.pe/bitstream/handle/UNH/3877/TESIS-2021-ING.%20AMBIENTAL-%20%20c3%91AHUINCOPA%20ESPEZA%20Y%20TAIPE%20BELITO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Smolinka, T., Kusnezoff, Bergmann, H., & Garchec, J. (2022). La historia de la electrólisis del agua desde sus inicios hasta la actualidad. Fuentes de energía electroquímica: fundamentos, sistemas y aplicaciones, 83-164. Obtenido de <https://www-sciencedirect-com.hemeroteca.lasalle.edu.co/science/article/pii/B9780128194249000100>

Srisiriwat, A., & Pirom, W. (2017). Feasibility Study of Seawater Electrolysis for

Photovoltaic/Fuel Cell Hybrid Power System for the Coastal Areas in Thailand. Thailand: Master Ciencia. Obtenido de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/241/1/012041>

Wenwei, T., Xinping, Z., Yusheng, Z., Guoqing, Y., Wenchi, G., & Yaming, N. (2012). Disinfection Effect and Its Mechanism of Electrolyzed Oxidizing Water on Spores of *Bacillus subtilis* var. *niger*. Obtenido de <https://link-springer-com.hemeroteca.lasalle.edu.co/article/10.1007/s10068-011-0123-5>

Wnag, S., & Yao, S. (2017). Efectos de la distancia entre electrodos y la corriente eléctrica en la generacion de cloro en aguas profundas electrolizaadas del oceano. Taiwan: Ciencia Directa.

Ziamba, C., & Morgenroth, E. (1 de Febrero de 2019). Comparing the anti-bacterial performance of chlorination and electrolysis post-treatments in a hand washing water recycling system. *Water Research X*. Obtenido de <https://www-sciencedirect-com.hemeroteca.lasalle.edu.co/science/article/pii/S2589914718300203>