

Elaboración de un prototipo generador de electrolisis salina para la formación de Ácido hipocloroso como agente antiséptico y desinfectante

Héctor Darío Tobón Benjumea

Asesor

Luisa Fernanda Calderón Vallejo

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA

Ingeniería Ambiental

2025

Resumen

Los estudios para la desinfección de patógenos en superficies, agua y alimentos son muy relevantes para garantizar la salud pública y promover la sostenibilidad dado que se puede reducir la incidencia de enfermedades infecciosas transmitidas por microorganismos que pueda afectar a las poblaciones más vulnerables, a su vez se mejora la calidad de vida por la posible disminución de costos asociados a la atención médica y por ende se protege la productividad económica.

Este proyecto se realizó con el objetivo de evaluar a nivel local una alternativa innovadora para la producción de ácido hipocloroso, el cual es considerado como un desinfectante más efectivo y seguro para la salud pública en general por las siguientes razones: Mayor efecto biocida que otras formas del cloro, menos tóxico e irritante al contacto humano, aprobado en la desinfección de alimentos y agua potable por la FDA, de menor impacto ambiental por su fácil descomposición además de que no genera subproductos, adecuado para la desinfección de superficies, eficaz para el control de enfermedades y manejo de pandemias, y seguro y efectivo para la desinfección de agua potable.

Por lo anterior, este estudio se enfocó en la creación de un prototipo de reactor para la producción de ácido hipocloroso por medio de electrólisis salina, el cual, además de lo anteriormente mencionado es conocido como un agente desinfectante eco-friendly, diez veces más efectivo que el hipoclorito de sodio, este último conocido por su alta eficacia, accesibilidad, versatilidad, bajo costo económico, y práctico, y el más comúnmente utilizado en nuestro país.

En este proyecto, se realizaron 15 ensayos, en los primeros 12, el prototipo funcionó como un reactor de tipo tubular de flujo continuo, variando el tiempo entre 22-30 segundos

como tiempo de residencia, sosteniendo igual característica para pH y variando concentración de la sal y voltaje, pero cambiando el voltaje desde un mínimo de 3.2 voltios hasta 10 voltios máximo, obteniendo resultados prometedores de cloro libre en voltajes mayores a 5 y concentraciones de sal desde los 0.18%, para concentraciones de rango cloro libre logradas entre 5 y 120 ppm según cada ensayo.

Para los restantes 3 ensayos se configuró el prototipo como reactor de flujo continuo variando el tiempo de 150-158 segundos, para pasar de un volumen total a flujo constante alrededor de 19 litros, mientras se dosificó por medio de una válvula Inyector Venturi la sal, para lo cual se evaluaron las concentraciones de sal cercanas a los 8600 ppm y rango de cloro libre generado de 5-10 ppm. Del total de ensayos, se encontró que el ensayo número 11 fue el que arrojó un menor costo en pesos colombianos (COP) por ppm de Cloro siendo este de 3.6 (se generó cloro por encima del rango de 120 ppm), mientras que el ensayo más costoso es el #1 con un costo de \$219 por cloro generado.

Palabras claves: Proceso de electrólisis salina; agente antiséptico; tecnología de desinfección; y desinfección sostenible.

Abstract

Studies for the disinfection of pathogens on surfaces, water and food are very relevant to guarantee public health and promote sustainability since the incidence of infectious diseases transmitted by microorganisms that can affect the most vulnerable populations can be reduced, in turn. Quality of life is improved due to the possible reduction in costs associated with medical care and therefore economic productivity is protected.

This project was carried out with the objective of evaluating at a local level an innovative alternative for the production of hypochlorous acid, which is considered a more effective and safe disinfectant for public health in general for the following reasons: Greater biocidal effect than other forms of chlorine, less toxic and irritating to human contact, approved for the disinfection of food and drinking water by the FDA, with less environmental impact due to its easy decomposition and does not generate byproducts, suitable for disinfecting surfaces, effective for control of diseases and management pandemics, and safe and effective for the disinfection of drinking water.

Therefore, this study focused on the creation of a reactor prototype for the production of hypochlorous acid through saline electrolysis, which, in addition to the aforementioned, is known as an eco-friendly disinfectant agent, ten times more effective than sodium hypochlorite, the latter known for its high effectiveness, accessibility, versatility, low economic cost, and practicality, and the most commonly used in our country.

In this project, 15 tests were carried out, in the first 12, the prototype functioned as a continuous flow tubular type reactor, varying the time between 22-30 seconds as residence time, maintaining the same characteristic for pH and varying concentration of the salt and voltage, but changing the voltage from a minimum of 3.2 volts to a maximum of 10 volts, obtaining

promising results of free chlorine at voltages greater than 5 and salt concentrations from 0.18%, for free chlorine range concentrations achieved between 5 and 120 ppm according to each test.

For the remaining 3 tests, the prototype was configured as a continuous reactor, varying the time from 150-158 seconds, to go from a total volume to a constant flow of around 19 liters, while the salt was dosed by means of a Venturi Injector valve. for which salt concentrations close to 8600 ppm and free chlorine generated range of 5-10 ppm were evaluated. Of the total tests, it was found that test number 11 was the one that showed the lowest cost in Colombian pesos (COP) per-ppm of Chlorine, being 3.6, while the most expensive test is #1 with a cost of \$219 per chlorine generated.

Keywords: Salt electrolysis process; antiseptic agent; disinfection technology; and sustainable sterilization.

Tabla de Contenido

Introducción	12
Planteamiento del Problema	14
Justificación del Problema	17
Objetivos	20
Objetivo General	20
Objetivos Específicos	20
Marco Teórico.....	21
Objetivos de Desarrollo Sostenible	21
Principios de la Electrólisis Salina para la Generación de Diferentes Formas de Cloro	21
Estado del Arte	28
Metodología	33
Esquema Metodológico.....	33
Selección Rango de Variables Independientes a Analizar	33
Diseño de la Geometría del Prototipo	40
Materiales y Equipos	47
Verificación y Validación.	50
Parte Experimental.....	53
Resultados y Análisis.....	57
Relación Entre Variables Observadas para 15 Ensayos.....	57
Relación Entre Variables Observadas en Régimen Estacionario (12 Ensayos)	58
Relación Entre Variables Observadas Para Reactor de Flujo Continuo (3 Ensayos)	62
Revisión Económica del Estudio	73

Discusión de Resultados.....	77
Limitaciones del Estudio.....	80
Aportes y Recomendaciones	81
Conclusiones.....	83
Referencias.....	85
Apéndice	89

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Porcentaje (%) Especies de Cloro Según pH.</i>	23
Figura 2. <i>Diagrama de Reactor Discontinuo.</i>	25
Figura 3. <i>Diagrama de Reactor Continuo Tubular.</i>	25
Figura 4. <i>Esquema Metodológico el Proyecto.</i>	33
Figura 5. <i>Balance de Materia Propuesto Para las Etapas del Proceso en Configuración Como Reactor Continuo.</i>	35
Figura 6. <i>Geometría del Electrolizador Ensamblado.</i>	41
Figura 7. <i>Posición y Distancia de Separación Entre Electrodo (Vista Interna del Electrodo).</i> 42	42
Figura 8. <i>Forma y Medidas del Electrodo de Titanio.</i>	45
Figura 9. <i>Vista de Reactor Ensamblado y Separado en Dos Partes por Medio de la Rosca del Accesorio Universal de 3”.</i>	50
Figura 10. <i>Equipo Generador de Fuente de Energía Continua CC.</i>	51
Figura 11. <i>Medidor Digital de Concentración de Sal, pH y Temperatura.</i>	51
Figura 12. <i>Analizador Elemental E-max Para Detección de Metales Pesados E-MAX.</i>	52
Figura 13. <i>Probador de Cloro Libre en Rango de (0-120) ppm (mg/L).</i>	53
Figura 14. <i>Relación Entre Voltaje, Amperaje y Concentración de la Sal.</i>	59
Figura 15. <i>Relación Lineal de Amperaje y Concentración de la Sal a Dos Valores de Voltaje (3.2V y 5V).</i>	61
Figura 16. <i>Rango Cloro Experimental Observado Mínimo, Rango Cloro Experimental Observado Máximo y Cloro Teóricos.</i>	62
Figura 17. <i>Variación del Amperaje con el Tiempo en los 3 Ensayos Realizados del Régimen Continuo, con Concentración de Sal de 0.86% y Voltaje Inicial de 10 Voltios.</i>	64

Figura 18. <i>Resultados de la Variación del Amperaje con el Tiempo en el Montaje Experimental.</i>	65
Figura 19. <i>Ponderación de Costos Para Producción de Ácido Hipocloroso Expresando Porcentaje de Costo por Cada Ensayo.</i>	76
Figura 20. <i>Gráfica de Costo en Pesos por Cloro Producido.</i>	77

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Resumen del Estado del Arte de Prototipos de Electrolisis</i>	29
Tabla 2. <i>Materiales, Equipos y Recursos Necesarios Para el Desarrollo del Proyecto.</i>	47
Tabla 3. <i>Resumen de Datos Estadísticos de Métodos de Análisis Utilizados en el Proyecto.</i>	54
Tabla 4. <i>Resumen de Variables Independientes Según Número de Ensayos.</i>	56
Tabla 5. <i>Resultados Obtenidos Para los 15 Ensayos.</i>	57
Tabla 6. <i>Valores Observados en el Instante de Tiempo VS Amperaje Observado en Fuente Corriente Continua.</i>	63
Tabla 7. <i>Valores Tabulados Para Cálculo del Área Bajo la Curva de los Ensayos a Régimen Continuo.</i>	66
Tabla 8. <i>Resultado de Cloro Libre Experimental y Cloro Libre Teórico Para Configuración Reactor Continuo.</i>	67
Tabla 9. <i>Control de Variación de pH Inicial y pH de la Mezcla en Ensayos de 9 al 13.</i>	69
Tabla 10. <i>Tasa de Producción Mol. s-1 cm-2 Para Descripción de la Capacidad de Cada Ensayo Según Condiciones de Voltaje y Concentración de la Sal.</i>	70
Tabla 11. <i>Mediciones Observadas Para Concentración de Iridio, Rutenio, Hierro y Titanio por Medio Equipo E. Max en Mezcla de Flujo F3 y F4 Usando Equipo MXRF.</i>	72
Tabla 12. <i>Ponderación de los Principales Costos de la Producción de Cloro Libre por Medio del Prototipo Para Cada Ensayo.</i>	75

Lista de Apéndices

Apéndice A. <i>Estudios y Manejo Estadístico de Tabla de Datos con Google Spread Sheet Para Cálculo de SD (Variación Estándar) y R2 de Equipo Digital Medidor de ppm NaCL.</i>	89
Apéndice B. <i>Estudios y Manejo Estadístico de Tabla de Datos con Google Spread Sheet Para Cálculo de SD (Variación Estándar) y R2 de Equipo Digital Medidor de pH.....</i>	90
Apéndice C. <i>Estudios y Manejo Estadístico de Tabla de Datos con Google Spread Sheet Para Cálculo de %RSD (Porcentaje de Variación Estándar) de Temperatura Medidas en ° Celsius. 91</i>	91
Apéndice D. <i>Estudios y Manejo Estadístico de Tabla de Datos con Google Spread Sheet Para Cálculo de %RSD por Cada Estándar de Laboratorio (Porcentaje de Variación Estándar) de Concentración de Hierro en ppm.</i>	92
Apéndice E. <i>Curva de Calibración y R2 de Rutenio, Calculado por Software de Equipo E-máx.</i>	93
Apéndice F. <i>Estudios y Manejo Estadístico de Tabla de Datos con Google Spread Sheet Para Cálculo de % RSD (Porcentaje de Variación Estándar), Para Cada Solución Estándar Preparada de Concentración de Rutenio en ppm.</i>	94
Apéndice G. <i>Curva de Calibración y R2 de Iridio, Calculado por Software de Equipo E-máx. 95</i>	95
Apéndice H. <i>Estudios y Manejo Estadístico de Tabla de Datos con Google Spread Sheet Para Cálculo de % RSD (Porcentaje de Variación Estándar) Para Cada Solución Estándar Preparada de Concentración de Iridio en ppm.</i>	96

Introducción

La pandemia de COVID-19 tuvo un impacto significativo en los enfoques y protocolos de desinfección del agua en todo el mundo. Los principales cambios y tendencias fueron de un mayor uso de tecnologías avanzadas de desinfección, refuerzo en el monitoreo de patógenos en aguas residuales, enfoques desinfectantes más seguros y efectivos, mejora en los protocolos de tratamiento en comunidades vulnerables y mayor conciencia sobre la calidad del agua. En definitiva, el control del COVID-19 promovió avances en la desinfección del agua y elevó los criterios para asegurar la erradicación de patógenos, ajustándose a retos venideros en el ámbito de la salud pública que también robustecieron los sistemas para reducir el peligro de pandemias futuras.

Según datos de la revista La República, la pandemia ocasionó que el gasto en productos de aseo para el hogar aumentará un 11% en el año 2020 (Solorzano, 2021). De otro lado, en el caso de las tecnologías avanzadas de desinfección, se ha encontrado que la desinfección electroquímica de agua de consumo ha dado excelentes resultados, esto ha llevado a algunas empresas internacionales a explotar este tipo de tecnologías para tratar el agua potable (Fernández, y Antón, 2021).

El presente proyecto tiene como objetivo la construcción de un prototipo para la producción de ácido hipocloroso ($HOCl$), que es uno de los más potentes agentes sanitizadores que existen desde concentraciones tan bajas como 225 ppm a 4 minutos de exposición, logrando efectos mico bactericidas (Coronado, 2011). El ácido hipocloroso es importante porque ha resultado ser la especie de cloro más eficiente para la desinfección contra microorganismos de superficies, agua, desinfecciones clínicas, entre otros.

Para lograr un diseño eficiente del prototipo objeto del proyecto, se estudió el estado del arte de diversos proyectos relacionados con la electrolisis salina, producción de especies de cloro por electrólisis y producción de ácido hipocloroso por electrólisis, para lograr la configuración que permitiera tener el mejor costo beneficio, tomando como variables principales la determinación la concentración de Cloro generados comparado con el costo en Pesos colombianos de la generación. Para lograr un diseño con buena rentabilidad se privilegió la utilización de componentes que fueran de fácil consecución en el mercado local y como segunda medida la posibilidad de importar elementos más especializados, como última opción

El equipo que se construyó se plantea como diseño modular, de aplicación en línea y en sitio. En el diseño se consideró el uso de Tubería en PVC y electrodos de Titanio con y sin recubrimiento especial de rutenio/Iridio. Como fuente de energía se utilizó un regulador de corriente continua que se alimentó directamente de la red eléctrica. Se evaluó un prototipo de uso de una lona separadora de las dos fases, que permitió la fluidez eléctrica de la celda electrolítica, la cual impide la mezcla de las soluciones formadas en el ánodo y el cátodo, como metodología alterna a las membranas de intercambio catiónico selectivo, que son muy útiles al momento de hacer el intercambio de iones, pero de mantenimiento costosas.

Por último, se realizaron mediciones finales de presencia de cloro libre para cada uno de los ensayos experimentales como evaluación de la concentración de ácido hipocloroso formado bajo la influencia de una solución reguladora de pH, que facilitó la obtención de una mayor concentración de ácido hipocloroso evitando su conversión en otra especie de cloro.

Planteamiento del Problema

La electroquímica ha sido estudiada y planteada como una alternativa interesante para los tratamientos ambientales, es así como Fernández Romero et. al (2021), han advertido que la desinfección electroquímica es de uso potencial para: agua para consumo humano, regeneración de aguas, agua de piscina, efluentes hospitalarios, entre otros, convirtiéndola en una especie con un alto grado de uso como agente limpiador y sanitizantes multiusos.

Otros estudios han encontrado que en solución acuosa el ácido hipocloroso es un ácido leve con un potencial constante de acidez (K_a , 25 grados Celsius) de 3×10^{-8} y propiedades desinfectantes intensas. A razón de esto y su inocuidad a concentraciones adecuadas, se ha identificado como un agente de limpieza y desinfectante útil (Block y Rowan, 2020). Durante la pandemia el ácido hipocloroso fue uno de los productos recomendados por la EPA (United States Environmental Protection Agency), lo que denota su importancia en la prevención de enfermedades virales (EPA, 2020).

Otros estudios que se han realizado de esta especie de desinfectante en el campo de la Odontología han resaltado la importancia de su acción antimicrobiana sobre los microorganismos de la biofilm dental, determinando su uso potencial en endodoncia regenerativa y en la recuperación de heridas (Lafaurie y Calderón, 2015).

En Colombia se han utilizado equipos de electrolisis salina avanzada para la purificación del agua de consumo de los animales (crías de pollo) y así disminuir su mortalidad, mejorando directamente la salud del ave, pues fue comprobado que los valores de mortalidad disminuyeron al dosificar el agua de consumo con dicho producto (Morales y Pacheco, 2021).

A pesar de que en Colombia se cuenta con empresas que venden este producto a granel, el precio muchas veces puede ser muy alto, lo cual se convierte en una limitación. Es así como

hacia el año 2019 durante el furor de la pandemia se vendía 1 Litro de ácido hipocloroso a \$20,300 COP, y en el año 2024 (Diciembre 2024) se puede conseguir 1 Litro de hipoclorito de sodio a \$12,500 COP, aunque el ácido hipocloroso sigue siendo más costoso que los desinfectantes comunes, con el paso del tiempo se ha reducido su precio y tomado más importancia por su alta efectividad (Wellquem de Colombia SAS, 2024).

Es importante resaltar que el transporte hacia las zonas rurales de Colombia termina de incrementar su precio y dificulta su almacenamiento, a causa de que esta es una especie de Cloro que, a pesar de su efectividad, también ha demostrado muy baja estabilidad y porcentajes de degradación altos. Uno de los mayores obstáculos que se han presentado en Colombia para las instalaciones de tecnologías de electrólisis, para la producción de productos con poder sanitizantes, desinfección de aguas de consumo humano o residuales, han sido históricamente sus altos precios, costo de mantenimientos altos, dificultad para su almacenamiento y estabilidad química. Sumado a esto, existe un desconocimiento de esta tecnología y la preferencia de otras tecnologías o limpiezas tradicionales con componentes químicos como el hipoclorito de sodio, que es bien sabido tiene una menor capacidad de limpieza.

A razón de las dificultades que se han presentado para el desarrollo de la tecnología y entendiendo el alto potencial que tendría una mejor comprensión y puesta en marcha de prototipos relacionados para la producción de ácido hipocloroso en sitio, para uso en la industria local, en poblaciones rurales y en general en toda actividad que requiera procesos de desinfección, se desea resaltar la importancia para la cual este proyecto está enfocado, que es hacia la resolución y aporte de una tecnología innovadora y que tiene el potencial de tener iguales o mejores rendimientos que las metodologías de desinfección tradicionales, ya que se prevé un mejor costo beneficio, mayor eficiencia en la limpieza y una posible auto sustentación

de los insumos en poblaciones, en donde, por ejemplo se cuente con la disponibilidad de los recursos tales como; energía solar , sal y agua, que puedan ser integrados de forma coordinada para la generación del ácido hipocloroso por medio de la electrólisis salina, logrando una producción sostenible.

Justificación del Problema

Se han realizado diferentes estudios para desinfección electroquímica de agua de consumo, que han dado excelentes resultados. Esto ha llevado a algunas empresas internacionales a explotar este tipo de tecnologías para tratar el agua potable (Fernández y Antón, 2021).

Este proyecto es innovador porque sustenta la producción de un producto con un alto beneficio, con materiales de fácil acceso como el agua, la sal y la electricidad, que se pueden conseguir en la mayoría de las regiones de Colombia. Adicionalmente evita el uso de membrana de intercambio iónico que es costosa y de difícil mantenimiento y por el contrario utiliza una tela cerrada, más económica, que impide la mezcla de los compuestos generados en el cátodo y ánodo, pero permite el flujo de los iones en ambos sentidos de la electrólisis.

Por otro lado, aunque en esta etapa de la investigación fue utilizada una fuente convencional de energía, a futuro se podría plantear el uso de energías alternativas como el uso de energía solar, por lo que el presente proyecto aplicado puede ser mejorado con el tiempo dado su estructura modular. Es de destacar que para evitar la corrosión química por el alto poder oxidante de los compuestos clorados y la sal, fueron utilizados tuberías y accesorios en PVC Y CPVC que soportan el flujo del agua, lo que indica que fueron utilizados materiales económicos en el desarrollo del prototipo.

En consonancia con las políticas mundiales y según la ONU, el 25 de septiembre de 2015 los líderes mundiales adoptaron un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible.

Los objetivos número 6 correspondientes a agua limpia y saneamiento, y también el número 9 relacionado con Industria, innovación e Infraestructura y el progreso tecnológico son los que están más relacionados con el presente proyecto. En dichos objetivos se procura descubrir soluciones duraderas para los desafíos económicos y medioambientales, como el aumento de la eficiencia energética y de recursos. (Organización para las Naciones Unidas - ONU, 2015). Teniendo en cuenta lo anterior, según el portal de las Naciones Unidas, en el que se observa el cumplimiento de los ODS de los países signatarios del acuerdo de París, y haciendo hincapié en los objetivos número 6 y 9, Colombia presenta en la actualidad una categoría como país con “grandes desafíos” en dichos objetivos (Naciones Unidas, 2024).

En beneficio de los objetivos de desarrollo mencionados, este proyecto busca aplicar nuevas tecnologías en saneamiento como alternativas innovadoras que puedan ser desarrolladas en comunidades, sectores y compañías, con presupuestos asequibles y sostenibles con el medio ambiente y los recursos naturales que aporten al cumplimiento de los ODS en mención.

Para el prototipo diseñado, los electrodos de titanio son un factor limitante, ya que no se consiguen actualmente en el mercado local por algún importador o fabricante local, luego entonces, deben ser importados puntualmente de Estados Unidos o China.

Se espera que este proyecto beneficie a la Industria local que por las características de sus procesos requieren de técnicas de desinfección complejas. En este caso, se puede producir en sitio un desinfectante potente contra diversos patógenos, minimizando aspectos logísticos y de costos frente a los productos disponibles en el mercado.

En concordancia con lo anterior, la sociedad en general del departamento del Valle del Cauca también se puede beneficiar, porque se espera que una vez finalizado el proyecto se

puedan hacer estudios para la aplicación del producto como agente de limpieza en pequeñas comunidades o población del área rural.

Cabe resaltar que este prototipo, podría tener también un impacto importante en centros de salud, restaurantes y hoteles, lugares en donde la desinfección se debe realizar de manera continua y profunda. Finalmente, con este proyecto se espera en general dinamizar la economía local con la compra de suministros especiales que se requieren y el mejoramiento de las condiciones de saneamiento en las actividades que requieran desinfección a razón de un mejor costo beneficio de la tecnología.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar el diseño y el ensamble de un prototipo para producción de solución acuosa de Ácido Hipocloroso por medio de electrolisis salina.

Objetivos Específicos

Seleccionar las variables y calcular sus rangos teóricos en el proceso de electrólisis salina en términos del tiempo de residencia, concentración de la sal en solución, voltaje, amperaje adecuado y cloro teórico.

Diseñar un prototipo técnico detallado del sistema de electrólisis salina, considerando los flujos, selección de materiales y componentes adecuados para garantizar eficiencia y seguridad del procedimiento.

Ensamblar los componentes seleccionados para el prototipo, asegurando que el sistema sea operativamente viable y cumpla con los parámetros requeridos para el proceso

Analizar la concentración de cloro obtenida, estableciendo la relación entre estos parámetros y las variables operativas, como amperaje, voltaje y concentración de sal, para validar el desempeño y costo beneficio del prototipo.

Marco Teórico

Objetivos de Desarrollo Sostenible

Es importante mencionar que este proyecto puede tener diferentes aristas que se relacionan directa o indirectamente con los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas particularmente los relacionados con innovación tecnológica, salud y medio ambiente.

Para el presente proyecto aplicado se relacionan los objetivos de desarrollo sostenible 3, 6, 9 y 12; Salud y bienestar, Agua limpia y saneamiento, Industria, innovación e infraestructura y producción y consumo responsable, puesto que por medio de una producción de agua electrolizada se consigue una limpieza innovadora, y al mismo tiempo se genera un consumo más responsable con los recursos ambientales dado que se espera producir el desinfectante en sitio, solo en cantidades requeridas y no en exceso, evitando así los desperdicios que normalmente se dan con pérdida de productos químicos que se degradan o cuando son vertidos al medio ambiente impactando negativamente el mismo.

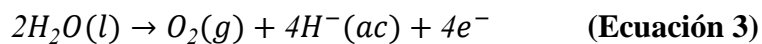
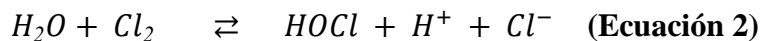
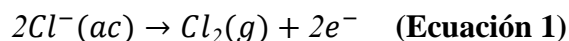
Desde el punto de vista del aporte a los ecosistemas, el presente proyecto se asocia con los objetivos de desarrollo sostenibles 13, 14 y 15; Acción por el clima, vida submarina y vida de ecosistemas terrestres, dado que la producción de ácido hipocloroso al ser un agente sanitizante de baja concentración se encuentra en muchos procesos biológicos de forma natural generado incluso por la células blancas como respuesta inmunitaria logrando disminuir la carga bacteriana hasta un 90% (Stroman et al.,2017).

Principios de la Electrólisis Salina para la Generación de Diferentes Formas de Cloro

Uno de los aspectos más importantes en la producción de ácido hipocloroso es el tipo de reacción química formada. Según Chang (2013), “los procesos electroquímicos son reacciones redox en donde la energía liberada por una reacción espontánea se transforma en electricidad, o

la electricidad se utiliza para inducir una reacción química. A este último proceso se le conoce como electrólisis” (p. 765).

En todo proceso de electrólisis se necesitan dos electrodos, llamados ánodo y cátodo. La reacción de oxidación se presenta en el ánodo y la reacción de reducción en el cátodo. El proceso de electrólisis de una disolución acuosa de cloruro de sodio es definido según Chang (2013) como un proceso de alta complejidad ya que se pueden llevar a cabo diversas reacciones (ecuaciones 1, 2, 3 y 4):

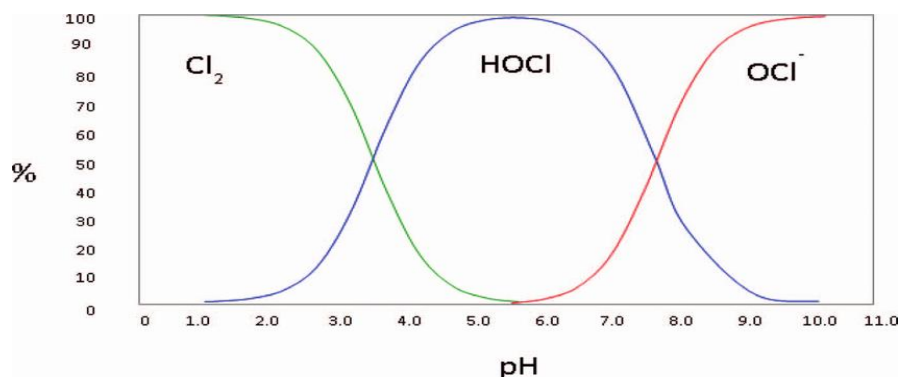


Teniendo en cuenta las reacciones mencionadas es relevante indicar que las reacciones de oxidación y reducción son realizadas en el ánodo, como se denota en las ecuaciones 1, 2 y 3. Por otra parte, la reacción de reducción se realiza en el cátodo que corresponde a la ecuación 4.

Este estudio tiene especial interés en la ecuación 2, que es aquella donde se observa que se genera en estado de equilibrio el ácido hipocloroso. Además de estas reacciones, se puede indicar que como se genera una reacción de equilibrio entre diferentes formas de cloro, esta puede ser afectada en mayor medida por el pH, así como se muestra en la figura 1.

Figura 1.

Porcentaje (%) Especies de Cloro Según pH.



Nota. La figura muestra el efecto del pH sobre la proporción de cloro en el agua. En color verde se presenta cloro (Cl₂); en azul el ácido hipocloroso (HOCl); y en rojo el hipoclorito (OCl⁻).

Fuente: Journal of Food Protection (2017).

La reacción 4 generada en el cátodo tiende a aumentar el pH puesto que se genera soda cáustica (NaOH), es importante resaltar la necesidad de separar ambos compartimientos para evitar la producción de especies con un menor potencial bactericida como lo es el ion hipoclorito (OCl⁻). Si se separan los flujos del ánodo y cátodo, se pueden obtener dos soluciones diferentes liberando especies gaseosas de Cl₂ y H₂ respectivamente. Sin embargo, si los dos flujos se mezclan se pueden formar nuevos compuestos como NaOCl dependiendo del pH (Wang et al., 2007).

De acuerdo con Song et. al (2020), exponen que la división del agua impulsada por electricidad puede facilitar el almacenamiento de energía eléctrica en forma de gas hidrógeno y como semirreacción de la división del agua impulsada por electricidad, la reacción de evolución de oxígeno (OER) puede ser un cuello de botella, debido a la cinética lenta de esta reacción de transferencia de cuatro electrones, en otras palabras, esta reacción es la reacción planteada en la ecuación 4 previamente.

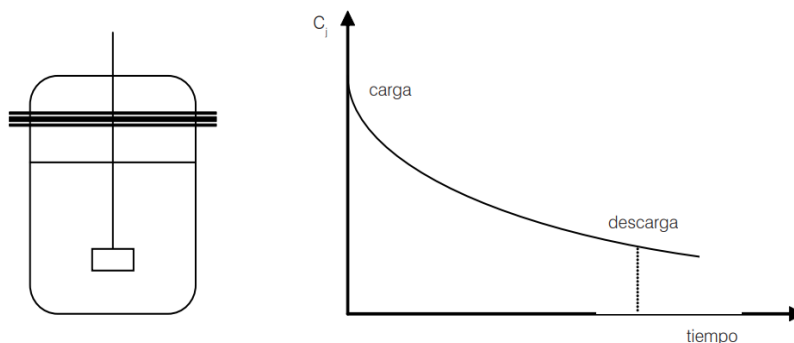
Para el caso del prototipo del presente proyecto, en el cual cabe resaltar que, aunque no es el objetivo de estudio la producción de Hidrógeno ni NaOH, si es importante determinar que para efectos de regulación del pH, se hace necesario determinar los factores que pueden aumentar o disminuir la eficiencia en el cátodo, lugar donde se produce la ecuación 4. Una alta concentración de NaOH puede generar según la figura 1 la producción de iones hipoclorito en lugar de la especie objetivo.

Respecto del hidrógeno producido (H_2), es importante resaltar que este no es objeto de interés principal de este estudio, pero sí puede ser revisado en investigaciones futuras para determinar posibles usos, de esta manera evitando que no se pierda como un subproducto de la reacción, es decir evitar que sea desaprovechado teniendo en cuenta que, actualmente, la humanidad se encuentra a la búsqueda de nuevas fuentes de energía.

En los procesos de electrólisis se presentan diferentes tipos de reactores. Este estudio pretende enfocarse en dos tipos de reactores como se muestra en las figuras 2 y 3 respectivamente; Diagrama de reactor discontinuo y diagrama de reactor continuo tubular. Como se muestra en ambas figuras, la concentración de los reactivos cambia de forma lineal para el reactor discontinuo y exponencial decreciente para el reactor continuo.

Figura 2.

Diagrama de Reactor Discontinuo.

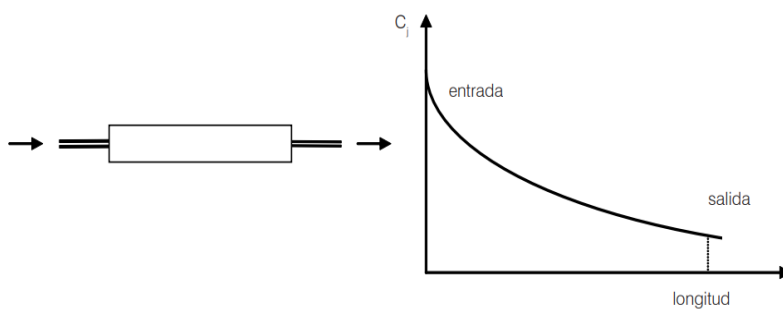


Nota. La figura muestra la variación de la concentración de reactivos en función del tiempo.

Fuente: Reactores Químicos: Curso introductorio (2020).

Figura 3.

Diagrama de Reactor Continuo Tubular.



Nota: La figura muestra la variación de la concentración de reactivos en función de la longitud.

Fuente: Reactores Químicos: Curso introductorio (2020).

Como plantean Bard y Faulkner (2001), el estudio de la velocidad de una reacción de electrólisis presenta una mayor complejidad en comparación con las reacciones que ocurren en solución o fase gaseosa, a razón de que la superficie de electrólisis se considera como un área heterogénea, en comparación con otro tipo de reacciones que presentan una mejor

homogeneidad. Caso contrario con las reacciones homogéneas, que se desarrollan de forma uniforme en todo el medio.

Por la naturaleza de su complejidad, las reacciones que contemplan electrodos se pueden ver afectadas entre otras cosas por: la Transferencia de masa ya que las moléculas deben difundirse desde la solución a la superficie del electrodo para que reaccione. Este proceso puede limitar la velocidad a la que se lleva a cabo la reacción, adicionalmente, los autores Bard y Faulkner (2001) mencionan que la difusión, procesos de convección relacionados con la hidrodinámica de la solución y migración relacionados con campos electromagnéticos pueden influenciar también el movimiento de partículas.

Por efectos superficiales, las propiedades del material del electrodo, como su composición y rugosidad, así como el estado de su superficie (contaminación, oxidación), pueden influir significativamente en la velocidad de la reacción (Bockris & Reddy, 1970). Por esta razón en diversos estudios se ha sugerido la expresión de la velocidad de la reacción en unidades de mol por segundo por unidad de área del electrodo (mol/s.cm²) como se muestra en la ecuación 5 (Bard y Faulkner, 2001).

$$Tasa (mol s^{-1} cm^{-2}) = \frac{i}{nFA} = \frac{j}{nF} \text{ (Ecuación 5)}$$

Donde:

$$i = \text{Ampere(coulomb/s)}$$

$$j = \text{Densidad de Corriente A/cm}^2$$

$$n = \text{estequiometría de electrones}$$

$$F = \text{Constante de Faraday 96500 Culombios /mol}$$

Una forma de relacionar la carga total en ampere respecto de la reacción generada es aplicar el número de peso equivalente de átomo según tabla de Faraday, la cual se puede apreciar en la Ecuación 6. (Ehl, y Ihde, 1954).

Ley de Faraday:

$$m = \left(\frac{Q}{F}\right) E \text{ (Ecuación 6)}$$

Donde:

F: Constante de Faraday = 96.500 C mol⁻¹.

Q: la carga eléctrica total que pasa a través de la sustancia (culombios).

E: El peso equivalente.

m: la masa de la sustancia liberada en un electrodo (g).

La Ley de Ohm, pieza fundamental del estudio de la electroquímica, establece una relación fundamental entre el voltaje aplicado, la corriente resultante y la resistencia inherente al sistema según la ecuación 7 (Millikan y Bishop, 1917) que se muestra a continuación:

$$V = R \times I \text{ (Ecuación 7)}$$

Donde:

V: Voltaje (Voltios)

R: Resistencia (Ohmios)

I: Corriente (Amperios)

En el contexto de la producción electrolítica de ácido hipocloroso, esta ley es relevante puesto que relaciona una manera simple de determinar cómo puede influir de manera crucial en la eficiencia del proceso, explícitamente en lo que respecta a la caída de voltaje y la eficiencia energética.

Estado del Arte

Una vez seleccionados los estudios de referencia del presente proyecto aplicado, se realizó una revisión de los antecedentes, los cuales se pueden apreciar en la tabla 1, donde se resaltan las características de los aspectos más relevantes como: concentración de la sal, concentración del ácido hipocloroso, voltaje, amperaje, volumen, tiempo de residencia, tipo de reactor, referencia, temperatura y país de los estudios analizados.

Producción de hidrógeno con un electrolizador sin membrana simple y escalable: En el proceso de electrólisis acuosa pueden ocurrir diversas reacciones que compiten por la corriente eléctrica aplicada. Es en ese sentido que el estudio de la producción de ácido hipocloroso está estrechamente relacionado con diversidad de reacciones complejas, dentro de las cuales la generación de hidrógeno se resalta con un alto interés, puesto que es importante para la transición energética. O'Neil (2016), estudió un proceso compuesto por celdas de flujo electroquímico sin membrana para producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua con uso de electrodos de mallas de flujo continuo a un determinado ángulo. Este estudio se desarrolló como un proceso muy sencillo, ya que puede generar HOCl sin el uso de una membrana de intercambio catiónico y son el flujo de entrada y el ángulo de ataque sobre los electrodos, los que realizan el proceso de separación evitando la mezcla de productos formados en el ánodo y cátodo. De este estudio se concluye que el mejor rendimiento de la celda se obtiene poniendo lo más cerca posible un electrodo del otro.

Tabla 1.*Resumen del Estado del Arte de Prototipos de Electrolisis.*

Título del estudio	Concentración de la sal (%) (p/p)	Concentración ácido hipocloroso	Voltaje(V)	Material y tipo del Electrodo	Dimensiones del electrodo (cm)	Amperaje (A)	Volumen (mL)	Tiempo (s)	Tipo de reactor	Referencia	Temperatura (°C)	País
Hydrogen Production with a Simple and Scalable Membraneless Electrolyzer	6	No aplica. Es electrolisis, pero se produce hidrógeno.	2.2	titanium mesh electrode.	0,5cm x2,5cm	0,2	555 mL	60	Flujo continuo membrana	O'Neil (2016)		USA
Production of electrolyzed water for home-used based on electrodeposited macroporous platinum	0.9	3.5 mg/L	3.3	Macroporous pT Films electrode		3,26	43	9.2		Kim, S. (2017)		República de Corea
Developing chlorine-based antiseptic by electrolysis	0.9%	117 mg/L	11.8	MOX electrodes		3	400	60		Mourad, K. A(2020, marzo 20)		Suecia
Electrosynthesis of hypochlorous	0.2%	640 mg/L			cm		200	14400		Murieta, M. F.,	26.85	México

Título del estudio	Concen tración de la sal (%) (p/p)	Concen tración ácido hipocloroso	Volta je(V)	Materi al y tipo del Electro do	Dimens iones del electro do (cm)	Amp eraje (A)	Volu men (mL)	Tie mp o (s)	Tipo de react or	Refer encia	Tempe ratura (°C)	País
acid in a filter-press electrolyzer and its modeling in dilute chloride solutions										(2021)		
Designing a high-efficiency hypochlorite ion generation system by combining cation exchange membrane aided electrolysis with chlorine gas recovery stream	20%	2386,93 mg/L	8	cell without CEM, with	3.3X 3.3cm	3,26		66000	Cl2 recovery stream	Kim, S. K.(2021)	18	República de Corea

Nota. Se resumen diversos estudios relacionados con la reacción de electrólisis haciendo mayor

énfasis en producción de ácido hipocloroso por diversos prototipos. *Fuente:* Autoría Propia (2025).

Producción de agua electrolizada para uso doméstico a base de platino macroporoso electrolizado: Kim (2017), proporciona un método para producir ácido hipocloroso de baja concentración directamente en líquido. Para facilitar la reacción química utilizó películas microporosas de Platino y también se comparó el electrodo de titanio normal contra un electrodo de titanio, pero revestido con platino (con un espesor aproximado de $\sim 3 \mu\text{m}$). Las conclusiones del estudio fueron contundentes sobre la producción de cloro libre ya que en muy poco tiempo (9.20 s) se logró producir utilizando el electrodo de películas micro porosas de Platino, las cuales facilitaron la reacción química, logrando así concluir que este sistema es adecuado para la producción de ácido hipocloroso a baja concentración.

Desarrollo de antiséptico a base de cloro mediante electrólisis: Para la producción de ácido hipocloroso también se han realizado estudios en hogares (en sitio). Mourad (2020) estudió la producción de HOCl por la reacción electrolítica de agua potable con pequeñas cantidades de hidróxido de sodio. Los resultados determinaron que el agua resultante con una concentración de HOCl de entre 0,005% y 0,01 %, puede ser un antiséptico contra la mayoría de bacterias y patógenos en 12 s. La solución que mejor desempeño obtuvo solo necesitó 2 g de NaCl, 12 V y 3 amperios de potencia con una concentración sostenida del valor del pH entre 5-6. En el mismo estudio se logró demostrar que los resultados más eficientes se obtuvieron con preparaciones en sitio y que un almacenamiento del HOCL producido se podía sostener durante 7 a 10 días después de la producción bajo condiciones óptimas con una degradación del 17%.

Electrosíntesis de ácido hipocloroso en un electrolizador de filtro prensa y su modelado en soluciones diluidas de cloruro: Murrieta (2021), logró determinar simulaciones de tipo CFD (simulación de fluidos computacional) frente a determinaciones experimentales realizando simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) durante la acumulación de

hipocloroso (HClO), a través de la oxidación anódica del ion cloruro (Cl^-), en condición ácida a pH 3, en un filtro-prensa celda equipado con una placa de óxidos de Ti|Ir-Sn-Ru y una placa de acero inoxidable 316 como ánodo y cátodo, respectivamente. Este experimento consideró un proceso de recirculación en tanque y la reacción lateral de evolución de oxígeno (OER) en donde finalmente se determinó que el 25% de la corriente formaba HOCl y el restante se disponía para la reacción OER. Cabe resaltar que la mejor electrólisis se alcanzó a 200 A m^{-2} , logrando $12,2 \text{ mol m}^{-3} \text{ HClO}$ después de cuatro horas, con una eficiencia y consumo de energía electrolítica del 25% y $0,023 \text{ kWh (g HClO)}^{-1}$ respectivamente.

Diseño de un sistema de generación de iones de hipoclorito de alta eficiencia combinando electrólisis asistida por membrana de intercambio catiónico con una corriente de recuperación de cloro gaseoso: Estudios más recientes por medio del uso de electrodos macroporosos, han logrado fabricar soluciones para uso doméstico de agua electrolizada, que no es más que ácido hipocloroso ligeramente ácido. Estos estudios consideran como efectiva contra diferentes microbios una concentración entre 3-5 ppm de HOCl formado logrado en un rango de pH de 5-6.5.

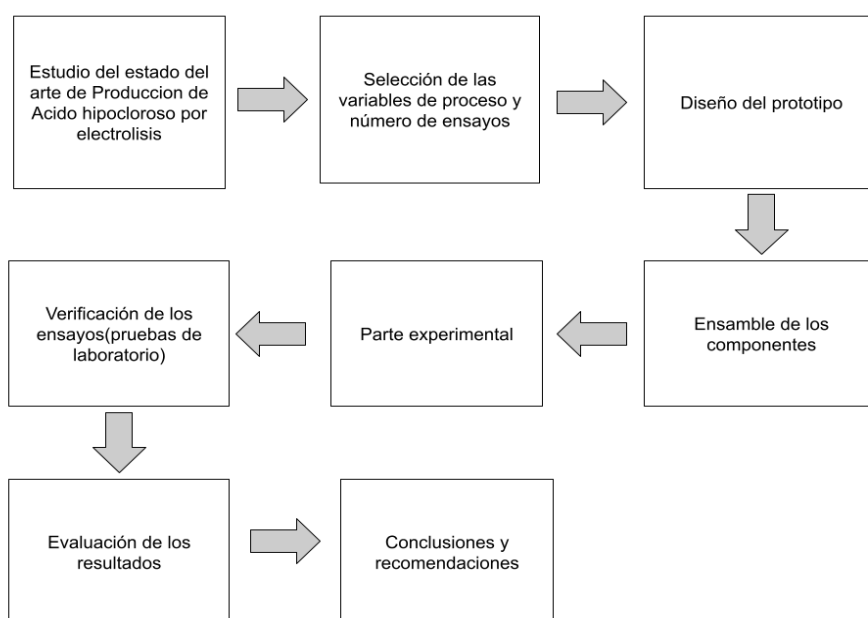
Metodología

Esquema Metodológico

El paso a paso utilizado para la consecución de los objetivos establecidos del presente proyecto aplicado se presenta en la figura 4, la cual muestra un orden cronológico para el abordaje del proyecto.

Figura 4.

Esquema Metodológico el Proyecto.



Fuente: Autoría Propia (2025).

Selección Rango de Variables Independientes a Analizar

Para realizar una revisión de las variables usadas en otros estudios, se organizó un resumen compilado en la tabla 1, sobre la cual se realizaron conversiones de algunos parámetros por medio de relaciones matemáticas y ecuaciones que se presentan más abajo en el siguiente documento. Cabe anotar que los estudios fueron obtenidos principalmente de bases de datos académicas como Science Direct, SpringerLink y Google Scholar.

Dado que para el estudio de Kim (2017), se referencia una medida de ms (mili Siemens) se realiza la conversión para obtener valor en ampere, acorde al siguiente calculo:

$$990 \text{ ms} \times \frac{10^{-3} \text{ A/V}}{1 \text{ ms}} = 0,99 \text{ A/V} = \text{Medida siemens}$$

Si se realiza la conversión a ampere se obtiene lo siguiente:

$$S = \frac{A}{V} \Rightarrow A = S \times X = 0,99 \text{ A/V} \times 3,3 \text{ V} = 3,26 \text{ Ampere}$$

Para determinar la concentración de la sal en el estudio de Murrieta (2021), se resuelve el siguiente cálculo:

$$\frac{35 \text{ mol NaCl}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{58,44 \text{ g NaCl}}{1 \text{ mol NaCl}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \times 100\% = 0,2\%$$

Para convertir el tiempo de horas a segundos, se toma la información del estudio de Murrieta (2021), y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Tiempo} = 4 \text{ horas} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ horas}} \times \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} = 14400 \text{ seg}$$

La concentración de ácido hipocloroso formada se convierte de mol a mg/L según los valores reportados por Murrieta (2021), de la siguiente forma:

$$\frac{12,2 \text{ mol HOCL}}{\text{m}^3} \times \frac{52,46 \text{ g HOCL}}{1 \text{ mol HOCL}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 640 \text{ mg/L}$$

Para determinar la concentración obtenida por Kim (2021) en mg /L, se procede de la siguiente manera:

$$45,5 \text{ mm} \times \frac{1 \text{ M}}{1000 \text{ mm}} \times \frac{1 \text{ mol HOCL/L}}{1 \text{ M}} \times \frac{52,46 \text{ g HOCL}}{1 \text{ mol HOCL}} \times \frac{1000 \text{ mg HOCL}}{1 \text{ g HOCL}} \\ = 2386,93 \text{ mg /L HOCL}$$

Para determinar el amperaje de Kim (2021), se relaciona el área del electrodo (3,3cm x 3,3cm =10,89 cm²) sobre la densidad de corriente así:

$$300\text{mA}/\text{cm}^2 \times \frac{1\text{A}}{1000\text{mA}} \times 10,89\text{ cm}^2 = 3,26\text{ A}$$

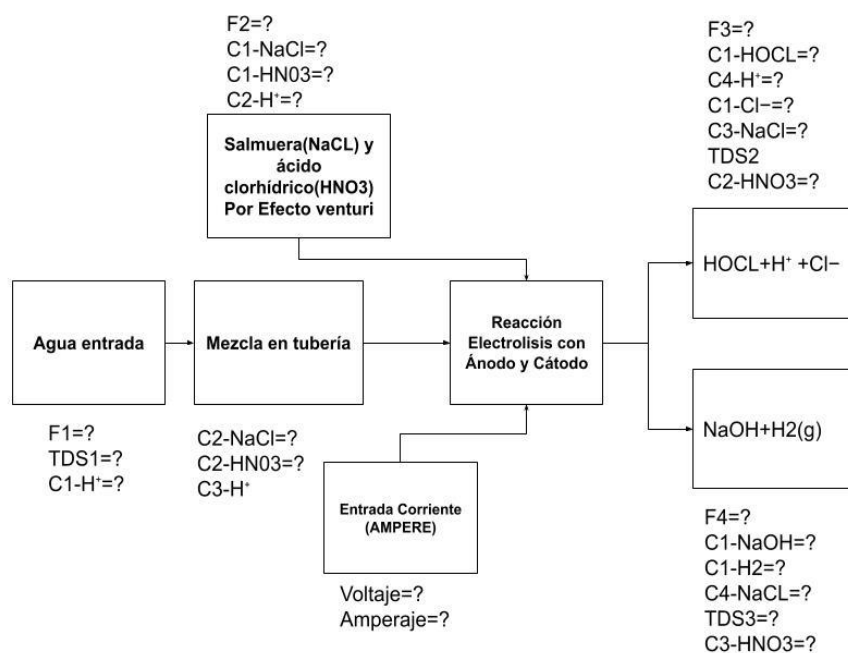
Todos los demás valores relacionados en la tabla 1, que no se especifican previamente en el desarrollo de la metodología, fueron encontrados explícitamente en cada estudio que fue revisado del estado del arte y no fue necesario realizar una conversión. Estas conversiones caben resaltar se realizaron con el objetivo de poder comparar y facilitar el análisis de los antecedentes, con magnitudes iguales.

Dado que la electrólisis consta principalmente de una reacción Redox de óxido-reducción en la que se pueden presentar diversas reacciones como las mostradas en las ecuaciones 1, 2, 3 y 4, se procedió con la propuesta de generación de un balance de materia teórico, según la figura 5.

Figura 5.

Balance de Materia Propuesto Para las Etapas del Proceso en Configuración Como Reactor

Continuo.



Nota. Suposición de las principales reacciones y flujos que se llevan a cabo durante la electrólisis. *Fuente:* Autoría Propia (2025).

Cómo se realizó una inyección Venturi en el flujo 2 (F2) que depende en gran medida de la apertura de la válvula Venturi y arrastre de la tubería en cuanto a presión y flujo, es decir, al flujo de entrada F1, se propuso realizar una calibración, en la cual se determinó el tiempo que tardó en llenar un determinado volumen del flujo 2, bajo las condiciones normales de entrada de F1.

Como se desea alcanzar una cantidad de F2 que permita tener la concentración deseada de sal del 1% a partir de una concentración de salmuera del 36% (concentraciones altas de salmuera permiten alcanzar menores volúmenes de almacenamiento del cloruro de sodio que es el reactivo de este estudio, la solubilidad del cloruro de sodio en el agua depende de las temperaturas de almacenamiento, en este estudio fue entre 25 y 30°C), teniendo en cuenta que el flujo de entrada con volumen total F2 es de 500 ml, se realizaron 5 mediciones para estimar un promedio de F2 con la válvula abierta parcialmente o totalmente abierta, como se describe a continuación.

Para el primer intento con la apertura total se determinó:

$$500\text{mL} \times \frac{36\text{gNaCl}}{100\text{mL}} = 180\text{g NaCl}$$

Volumen de solución en 33 segundos fue de 3700 gramos de agua para lo cual se logra una concentración de sal a la salida de la mezcla en la tubería C2-NaCl igual a:

$$\frac{180\text{g NaCl}}{3700\text{mL}} \times 100\% = 4.86\% \text{ NaCl}$$

Teniendo en cuenta que el porcentaje obtenido es mucho mayor al deseado inicialmente (1%), se optó por hacer un cierre del Venturi para disminuir la cantidad de salmuera que pasa por unidad de tiempo. Para esta razón se procede con el cierre a la mitad del Venturi y se determinó que después de proceder con el ejercicio para la válvula abierta en varios puntos se encuentra que en el punto 1 un volumen total de agua de 19.8L se demoró 140 segundos en pasar.

Si se tienen en cuenta estos valores obtenidos anteriormente y que 19.8L equivalen en mL a 19800 mL; la concentración de la sal en solución sería equivalente con dividir la cantidad de sal en gramos que aporta la solución de salmuera, que se calculó de 180 gramos y se tendría:

$$\frac{180g NaCl}{19800mL} \times 100\% = 0,9\% NaCl$$

El valor anterior de 0.9% sería muy cercano al valor buscado para los 15 ensayos propuestos, ya que una concentración de alrededor del 1% fue encontrada como óptima por obtención de buenos resultados en los antecedentes consultados.

Para calcular la concentración inicial requerida de ácido nítrico C1-NH3 necesaria para mantener el pH dentro del rango de 6 unidades y teniendo en cuenta que la concentración inicial del pH en agua es 7 se tiene en cuenta la ecuación 8.

$$(C3 - H^+) = \frac{(C1-H^+ \times F1) + (C2-H^+ \times F2)}{F1+F2} \quad \text{(Ecuación 8)}$$

Donde:

$(C3 - H^+)$ = pH Mezclado en la tubería =6 (valor deseado)

$(C1 - H^+)$ = pH a la entrada medido =6,77

$(C2 - H^+)$ = pH a la salida del Venturi = Valor a calcular =?

$F1$ = Flujo de entrada 1 (llave del agua)

$F2$ = Flujo de entrada (Venturi).

El pH se define como:

$$pH = -\log_{10}[H^+] \quad \text{(Ecuación 9)}$$

En consonancia se reemplaza la Ecuación 9 con las concentraciones $(C3 - H^+) = 6$ y $(C1 - H^+) = 6,77$ y se tiene que:

$pH = -\log_{10}[H^+]$ si se aplica antilogaritmo para calcular la concentración de $[H^+]$ se tiene que: $10^{pH} = 10^{-\log_{10}[H^+]}$

Al reemplazar los valores se tiene que:

$$10^7 = 10^{-\log_{10}[H^+]}$$

$$[H^+] = 10^{-7} = (C1 - H^+) = 0,0000001698M \text{ para F1.}$$

$$[H^+] = 10^{-6} = (C3 - H^+) = 0,000001 M \text{ Para F3.}$$

$$pH = -\log_{10}[H^+]$$

Si se reemplaza en la Ecuación 8 los siguientes valores:

$(C3 - H^+) = 0,000001M$ y $(C1 - H^+) = 0,0000001698M$ tenemos que:

$$0,000001 = \frac{(0,0000001698 \times 19,85L) + (C2 - H^+ \times F2)}{0,5L + 19,85L}$$

$$C2 - H^+ = \frac{(0,000001M \times (20,25L) - 0,0000001698M \times 19,85L)}{0,5L} = \frac{0,00001687mol}{0,5L}$$

$$= 0,00003374M$$

Convirtiendo los moles de concentración de HNO_3 a gramos /litro para conocer qué concentración de la solución inicial de HNO_3 es necesaria, se tiene que:

$$0,00003374M = \frac{0,00003374mol \ HNO_3}{Litro}$$

Teniendo en cuenta el valor previamente obtenido de $0,00003374mol \ HNO_3/L$ y suponiendo que se quiere preparar una solución de 3.8litros se tiene que:

$$3,8 \text{ l solución } l \times \frac{0,00003374 \text{ mol } l \text{ mol } H^+}{Litro} \times \frac{1 \text{ mol } HNO_3}{1 \text{ mol } H^+} \times \frac{63,02gHNO_3}{1mol \ HNO_3}$$

$$\times \frac{100g \text{ Solucion } l}{51,32gHNO_3} = 0,01574g$$

Dado que esta cantidad es muy pequeña y difícil de medir en la realidad, se propuso hacer una disolución de 10 ml de solución en 1 galón (3.8 litros) para bajar la concentración y consecuentemente el pH de la solución inicial y de esta manera obtener una segunda solución con menor concentración.

$$\frac{10\text{mLSi}}{3.8\text{litros S2}} \times \frac{1\text{ l Si}}{1000\text{mL Si}} \times \frac{1314,8\text{g Si}}{1\text{litro Si}} \times \frac{51.32\text{ gHNO3}}{100\text{g S1}} \times \frac{1\text{mol HNO3}}{63,02\text{g HNO3}} = \frac{0,028\text{mol HNO3}}{\text{L S2}}$$

Donde:

Si = Solución Inicial concentrada de ácido nítrico. Los valores de concentración y densidad son aportados por el proveedor.

S2 = es la solución dos formada por la nueva disolución.

Tomando la Ecuación 8 se tiene que:

$$(C3 - H^+) = \frac{(C1 - H^+ \times F1) + (C2 - H^+ \times F2)}{F1 + F2}$$

Donde:

$$(C3 - H^+) = \text{concentración deseada de } [H^+] = 0,00003374M$$

$$C1 - H^+ = \text{Concentración del agua} = 0,0000001698M$$

$$C2 - H^+ = \text{concentración de solución 2} = 0,028 M$$

$$F1 = 3,8 - F2$$

$$F2 = ?$$

$$FT = F1 + F2 = 3,8L$$

$$0,00003374M = \frac{0,0000001698M \times (3,8 - F2) + (0,028 \times F2)}{3,8}$$

$$0,00003374M \times 3,8 = 0,0000001698M \times (3,8L - F2) + (0,028M) \times F2$$

$$0,00003374M \times 3,8 = 3,8 \times (0,0000001698M) - F2 \times 0,0000001698 + (0,028M) \times F2$$

$$0,00003374M \times 3,8 - 3,8 \times (0,0000001698M) = F2(0,028M - 0,0000001698M)$$

$$F2 = \frac{(0,00003374M \times 3,8L) - (3,8L \times 0,0000001698M)}{(0,028M - 0,0000001698M)} = \frac{0,0001275}{0,0279} = 4.56ml$$

A partir de la solución 2 se busca conseguir una tercera solución (solución 3) con la cual se pretende hacer una cantidad de 3 galones o aproximadamente 11.4 litros de solución para tener una cantidad suficiente de F2 o flujo a la salida de inyector Venturi, que dure para los 15 ensayos.

$$11.4l \text{ solución } S2 \times \frac{0,00003374 \text{ mol } 1 \text{ mol } H^+}{\text{Litro}} \times \frac{1 \text{ mol } HNO3}{1 \text{ mol } H^+} \times \frac{63,02gHNO3}{1 \text{ mol } HNO3} \times \frac{1000g \text{ Solucion } 2}{1,77 gHNO3}$$

$$= 13,69 HNO3gS2$$

Para lo cual se obtiene una cantidad de solución 2 requerida igual a:

$$3.8 \text{ litros} \times \frac{0,00003653 \text{ mol } 1 \text{ mol } H^+}{\text{Litro } s2} \times \frac{1 \text{ mol } HNO3}{1 \text{ mol } H^+} \times \frac{63,02gHNO3}{1 \text{ mol } HNO3} \times \frac{100g \text{ Solucion } 2}{0,135 gHNO3}$$

$$= 6,5g \text{ Solucion } 2$$

Posteriormente se debe aplicar la ecuación 9 para la dilución así:

$$c1 \times v1 = c2 \times v2 \text{ (Ecuación 9)}$$

$$V1 = \frac{c2 \times v2}{C1} = \frac{0,00003374M \times 11,4l}{0,028M} = 13.73mL$$

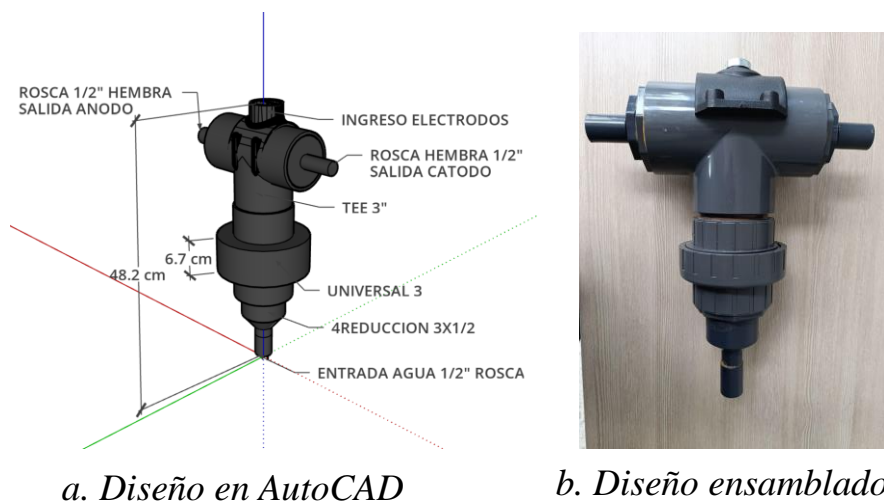
Diseño de la Geometría del Prototipo

Para este apartado se tomó en cuenta en primer lugar la dimensión del juego de electrodos 10 x 6.3 cm de largo y ancho cada uno. Estas dimensiones eran una primera limitante para acomodar los electrodos dentro de un accesorio de PVC que tuviera un diámetro más cercano al del electrodo, encontrando entonces el tamaño de 3", como se muestra en la figura 6 en el accesorio TEE 3", lugar donde quedaron embebidos ambos electrodos.

Puesto que las pruebas se realizaron con flujo de agua potable doméstico (que son de tuberías de ½" con flujo entre 0.1 -0.13litros por segundo), se evaluaron diferentes posibilidades de configuraciones, que permitieran el reactor funcionar de dos formas: continua y estacionaria, dando como resultados la composición mostrada en la Figura 6.

Figura 6.

Geometría del Electrolizador Ensamblado.



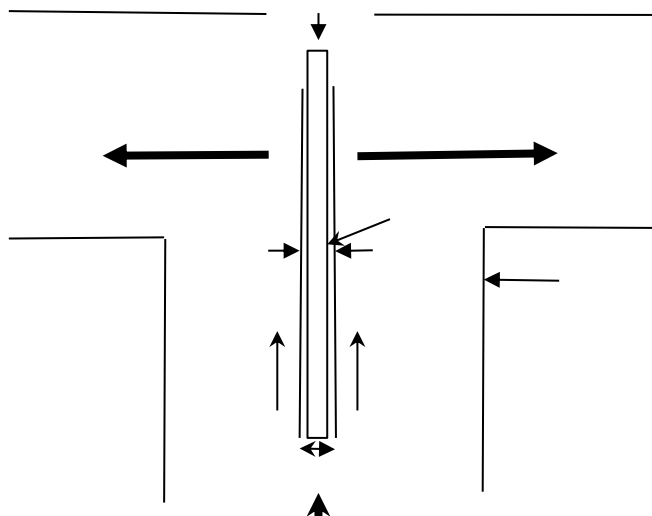
Fuente: Autoría Propia (2025).

El diseño del electrolizador facilita la entrada de agua por su sección inferior. A través de un sistema de tuberías, el agua se mezcla con una solución salina mediante un inyector Venturi. Este inyector, ajustable mediante un sistema de palanca, permite regular la concentración de sal en el flujo de agua, asegurando la homogeneidad de la mezcla. El flujo laminar constante del agua, combinado con un recorrido de 5 metros de tubería de ½ pulgada (como se ilustra en la Figura 4), garantiza una concentración salina uniforme antes de ingresar al electrolizador.

Cuando la sal ingresa en posición vertical hacia la altura del comienzo de la Tee PVC de 3" se encuentran internamente los electrodos, cátodo y ánodo separados por la tela seleccionada, tal como se muestra en la figura 7.

Figura 7.

Posición y Distancia de Separación Entre Electrodo (Vista Interna del Electrodo).



Fuente: Autoría Propia (2025).

Esta geometría permite que exista un canal en el cual se permite la reacción electrolítica formando los compuestos en ambos lados del reactor, pero a su vez y con el mismo flujo del equipo permite que no se acumulen y se mezclen de forma significativa.

En el diseño del prototipo es relevante entender el comportamiento de los iones producidos en el sistema, especialmente cuando el prototipo opera como un reactor estacionario sin flujo de agua. Uno de los aspectos importantes a evaluar es el tiempo que tarda el ion H^+ (generado en el ánodo), en difundirse uniformemente a través del volumen del reactor. En ese sentido si se realizan aproximaciones de la ley de Fick, se puede calcular el tiempo que se

demora en difundir o mezclar totalmente sin la presencia de otros factores como presión por flujo de agua. Esta ley de Fick se define según Bird et al. (2002) de la siguiente manera:

$$j_A = -D_{AB} \nabla C_A \text{ (Ecuación 10)}$$

En donde:

C: Concentración soluto

D: Coeficiente de difusión

r: Distancia radial

A razón de que la ley de Fick es difícil de calcular en campo, solamente se tendrá en cuenta el coeficiente de difusión D para compararlo con el flujo obtenido de forma experimental, el cual se trata del tiempo que se demora en pasar el agua por la sección transversal del área del tubo que es igual a:

$$A (\text{tubo}) = 2\pi r^2 \text{ (Ecuación 11)}$$

si $r = 3.88\text{cm}$, se tiene que:

$$A (\text{tubo}) = 2\pi(3.88\text{cm})^2 = 94.54\text{cm}^2$$

Para calcular el volumen V se debe calcular primero el volumen total del prototipo que se obtiene calculando el volumen total, que sería la capacidad de contenedor del prototipo que se puede obtener por cálculo matemático de volúmenes separados, o por medición del peso con y sin agua. Para este estudio se utilizó este procedimiento y se calculó de esta forma:

Peso prototipo sin agua = 3.650 Kg

Peso prototipo con agua = 4.939 Kg

$$\text{Almacenamiento} = (\text{Peso prototipo con agua} - \text{Peso prototipo sin agua}) \frac{1\text{ml H}_2\text{O}}{1\text{g Agua}} = 1289\text{mL}$$

Obteniendo:

$$1289mL \times \frac{1l}{1000mL} \times \frac{1m^3}{1000L} = 0,001289m^3$$

Una vez se determinó el volumen, se procedió a pasar esta cantidad de agua a través de la tela separadora solamente por fuerza de gravedad obteniendo como resultado 2142 segundos.

El volumen se puede relacionar con la ecuación 12:

$$V = AxE, \text{ en donde } A = \text{área y } E = \text{espesor} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Si se tiene en cuenta que el espesor de la tela observado es de 4mm o 0.4cm despejando A se encuentra el siguiente resultado:

$$A = \frac{v}{E} = \frac{94.54cm^2}{0.4cm} = 236.35cm^2$$

Si decimos que la constante de difusividad tiene magnitudes de área/segundo tenemos que:

$$D_c = \frac{A}{t} = \frac{236.35cm^2}{2142 S} = \frac{0.11cm^2}{s} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Esta magnitud D_c , como se mencionó antes no se trata de la constante de difusividad ni pretende presentarse como tal, pero se calcula para estimar que factor entre difusión y mezcla directa podría primar al momento de influir en el paso de los iones, reactivos y/o productos generados en ambos electrodos, teniendo en cuenta que simulará el paso de un lado hacia otro con la oposición de la tela.

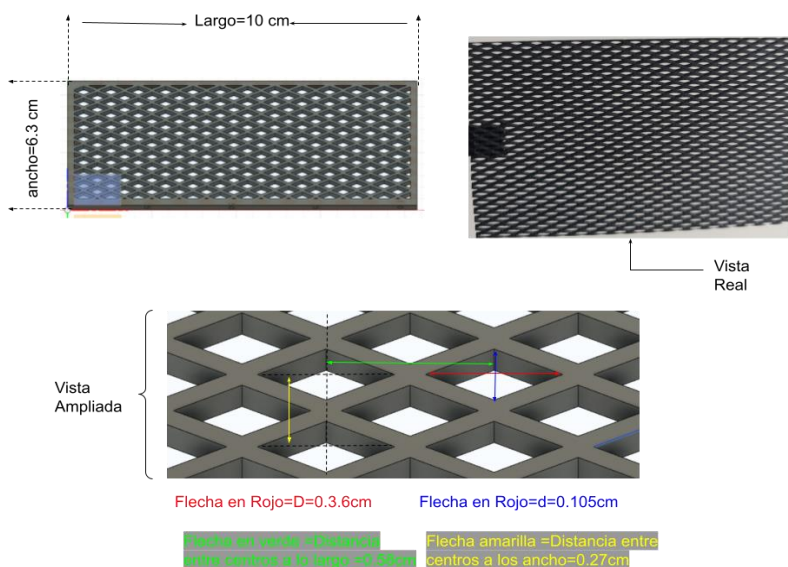
Según el valor encontrado en las tablas la difusividad del ion H^+ en agua a 25 grados Celsius es de $9.31 \times 10^{-5} cm^2/s$, esto se define según tablas de difusividad de Bird et al. (2002). Ya que el valor encontrado para el paso del agua a través de la tela es mayor, se considera este fenómeno como el de mayor ponderación al momento de una posible mezcla. Es decir, la difusividad como fenómeno de transporte es despreciable frente a la permeabilidad de la tela

separadora. También es importante resaltar que valores de tiempo en reactores estacionarios para evitar la mezcla por cualquiera de los dos factores deberían estar por debajo de los 2142 segundos. Para este estudio se pretendió generar una reacción en cortos periodos de tiempo y es en ese sentido que los tiempos sobre los cuales se evaluó la producción de ácido hipocloroso en solución en este proyecto **se determinó máximo en 158 segundos** como se muestra en la tabla 8, en la sección de los resultados.

El área del electrodo es importante conocerla para el cálculo de densidad de corriente por área. En ese sentido, se identifican ambos electrodos cátodo y ánodo con igual tamaño, los cuales tienen forma de lámina perforada con agujeros en forma de rombo. Esta construcción es por hilos soldados aplanados, los cuales al ser soldados quedan con la apariencia antes descrita, tal y como se muestra en la figura 8.

Figura 8.

Forma y Medidas del Electrodo de Titanio.



Nota. La figura muestra las medidas del tipo de ranura del electrodo de tipo rombo y la distancia entre centros de los rombos en dirección (Largo) y (ancho). *Fuente:* Autoría Propia (2025).

Según Déplanche (1996), la fórmula de un rombo se define como:

$$\text{Área Rombo} = \frac{Dxd}{2} \text{ (Ecuación 14)}$$

En donde: $D =$ Diagonal largo del rombo y $d =$ Diagonal pequeña del rombo

Para el cálculo del área se aplica la fórmula y se tiene que:

$$\text{Área Rombo} = \frac{0.36\text{cm} \times 0.105\text{cm}}{2} = 0.0189\text{cm}^2$$

Para calcular el área útil del electrodo o en otras palabras el área del electrodo se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Área de la malla} = \text{Area Total} - \text{Area perforada} \text{ (Ecuación 15)}$$

$$\text{En donde área total} = \text{largo} \times \text{ancho} = 10\text{cm} \times 6.3\text{cm} = 63\text{cm}^2$$

Para el área perforada se tiene que:

$$\text{Área perforada} = X (\text{Área del rombo}) \text{ (Ecuación 16)}$$

$$\text{Donde: } X = \# \text{ Total de Rombos}$$

Donde:

$$X = \left(\frac{\text{Largo}}{(\text{Distancia entre centro largo})} \right) \times \left(\frac{\text{Ancho}}{(\text{Distancia entre centros ancho})} \right) \text{ (Ecuación 17)}$$

Si se reemplazan los valores teniendo en cuenta las medidas explícitamente mencionadas en la figura 8 se obtiene que:

$$x = \# \text{ Total de Rombos} = \frac{10\text{cm}}{0.58\text{cm}} \times \frac{6.3\text{cm}}{0.27\text{cm}} \approx 402 \text{ Rombos}$$

Área del Rombo:

$$\text{Área perforada} = 402 \times 0.0189\text{cm}^2 = 7.6\text{cm}^2$$

Finalmente reemplazando en la ecuación 16 se tiene que;

$$\text{Área de la malla} = \text{Área Total} - \text{Área perforada} = 63\text{cm}^3 - 7.6\text{cm}^2 = 55.4\text{ cm}^2$$

Materiales y Equipos

En el desarrollo de este proyecto se tuvieron en cuenta los componentes del reactor, los equipos de laboratorio, equipo humano y tecnológico, para llevar a cabo las mediciones de Ácido hipocloroso formado. El detalle de todo se presenta en la tabla 2.

Tabla 2.

Materiales, Equipos y Recursos Necesarios Para el Desarrollo del Proyecto.

Recurso	Descripción	Presupuesto (\$)
Equipo Humano	Horas de Investigación y desarrollo de las actividades	3,000,000
Equipos y Software	Computador portátil y impresora	1,000,000
Servicios públicos	Agua, internet y energía estimada consumida	500,000
Accesorios PVC SCH 80(UN=Unidad)	TEE 3" PVC SCH 80, 3 unidades adaptador HEMBRA PVC SCH 80, UNIVERSAL PVC 3", 3 UNIDADES DE REDUCCIÓN PVC DE 3X1/2". Pegante 1/4, TUBERÍA 3 10 CM	300,000
Accesorios PP Y PE	ADAPTADOR MACHO RÁPIDO PE A PVC DE 1/2,5 METROS TUBERÍA 16MM	40,000
Manguera Teflón	1 metro 1/4	100,000
Electrodos	2 electrodos de malla de titanio	200,000
Medidor cloro y pH	Medidor De Cloro 2 En 1 Ph Pc-102 Ph Tester De Cloro	150,000
Fuente de alimentación DC	Fuente de alimentación necesaria para cambiar energía alterna a corriente continua de (0-30) voltios y (0-10) amperios.	375,000

Recurso	Descripción	Presupuesto (\$)
Multifunction Tester	Medidor multifuncional de pH, TDS, EC salinidad.	200,000
Cintas de cloro libre	Medidor de cloro libre por comparación con cinta en rango de 0-120 ppm	100,000
Herramientas y otros	Sierra, lija, flexómetro, marcador, Guantes	130,000
TOTAL		6,095,000

Nota. Presupuesto de Proyecto. *Fuente:* Autoría Propia (2025).

Procedimiento de Ensamble de los Componentes: Los materiales utilizados son los especificados en la tabla 2, los cuales son acordes con la normatividad americana ASTM PVC SCH 80; ASTM D 1784 Y ASTM D 2467.

Herramientas:

- Sierra para PVC
- Lija para PVC
- Imprimación para PVC
- Cepillo para aplicar la imprimación
- Flexómetro
- Marcador
- Guantes de seguridad

Las normas americanas para soldar tubería PVC se encuentran en la norma ASTM D2564. Esta norma establece los requisitos para la preparación de la superficie, la aplicación del imprimador y el adhesivo, y el tiempo de curado. A continuación, se presentan los pasos para el ensamble del prototipo.

Corte de la tubería PVC a la medida deseada: Se utilizó una sierra para PVC para cortar la tubería a las medidas especificadas 10 cm para tubería de 3" y de 2 cm para tubería ½". Se aseguró de que los cortes estuvieran limpios y cuadrados.

Biselado de los extremos de la tubería PVC: Se utilizó una lija para PVC para lijar los extremos de la tubería, con el objetivo de ayudar a que el imprimador, el adhesivo y el accesorio se adhieran mejor, formando un sello que impida la fuga de los líquidos por las conexiones.

Limpietas e imprimación a los extremos de la tubería PVC: Se utilizó un limpiador para quitar todo tipo de contaminación en la superficie del imprimante. Este se aplicó a los extremos de la tubería con el objeto de ablandar las superficies y garantizar una óptima unión libre de fuga. Este proceso se realiza asegurando de que la imprimación cubra toda la superficie del extremo de la tubería.

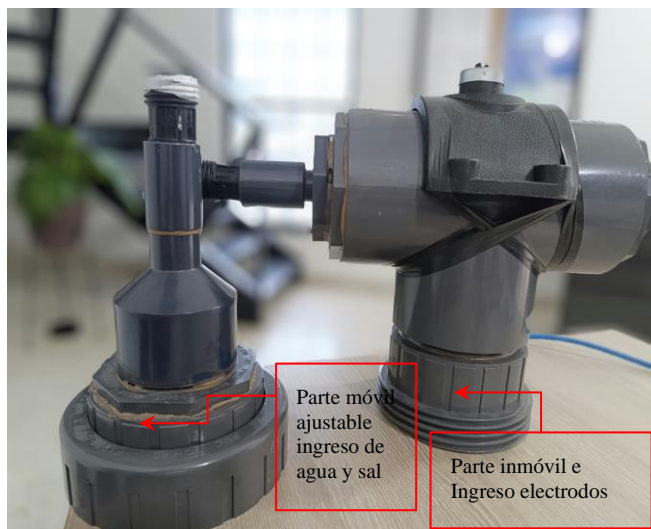
Aplicación de soldadura a los extremos de la tubería PVC: Se utilizó un aplicador de adhesivo para aplicarlo a los extremos de la tubería, asegurando que este cubra toda la superficie del extremo de la tubería.

Ensamble las piezas de la tubería PVC: Se juntaron las piezas de la tubería PVC y se presionó firmemente durante 40 segundos tratando de que las piezas quedaran alineadas correctamente y que los accesorios ingresaran hasta el tope. El orden de las uniones se realizó así: Niple de tubo 3" con Universal. Después se pegó el extremo del niple que quedó por fuera del accesorio (aproximadamente 5 cm), para unir un extremo de la universal que quedara inmóvil con el accesorio TEE y por donde queda lado de operación (Lugar para introducir y retirar electrodos) y mantenimiento del electrodo. En los extremos de la TEE se colocó reducción de ½" en cada lado y los adaptadores con salida hembra en ½" roscada. La parte inferior de la universal que es la parte desprendible se debe unir con una reducción a ½" con salida hembra roscada

también, para conexión con adaptador hembra del ingreso del flujo de la TEE. La salida de los electrodos para el ingreso de la corriente eléctrica se dejó por la parte superior de la TEE con una perforación que debe quedar totalmente nivelada para evitar la fuga de líquido. Finalmente, el ensamble quedó como se muestra en la figura 9, es decir antes de ser enroscada la universal.

Figura 9.

Vista de Reactor Ensamblado y Separado en Dos Partes por Medio de la Rosca del Accesorio Universal de 3”.



Fuente: Autoría Propia (2025)

Tiempo de curado: El tiempo de curado fue de 1 día entero desde la última conexión antes del uso del prototipo.

Verificación y Validación.

Para determinar las variables del proceso se tuvieron diferentes métodos analíticos cualitativos y cuantitativos que permitieron llevar a cabo las pruebas necesarias para generar unos resultados consistentes que permitieron realizar análisis sobre el prototipo.

Para el control del amperaje y voltaje utilizados en cada prueba, se usó una fuente de energía continua de carga eléctrica con pantalla que permitió observar los voltajes y amperios. La Fuente de alimentación CC (corriente continua) fue regulada con conmutación ajustable y variable (0-30 V 0-10 A) con pantalla LED de 4 dígitos, como lo muestra la figura 10.

Figura 10.

Equipo Generador de Fuente de Energía Continua CC.



Fuente: Autoría Propia (2025).

Para la determinación de la concentración de la sal y pH y temperatura, se utilizó un medidor digital 5 en 1, de calidad del agua que puede medir pH, TDS (ppm), EC (conductividad), salinidad (ppt) y temperatura, mostrado en la figura 11.

Figura 11.

Medidor Digital de Concentración de Sal, pH y Temperatura.

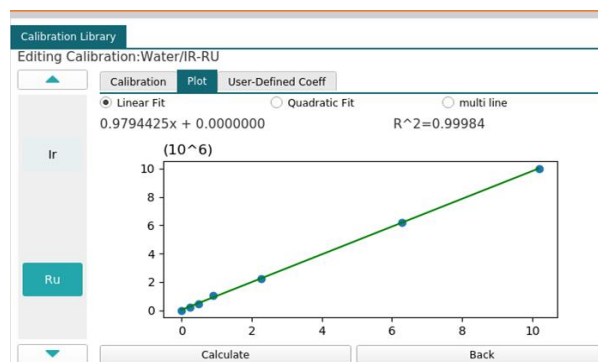
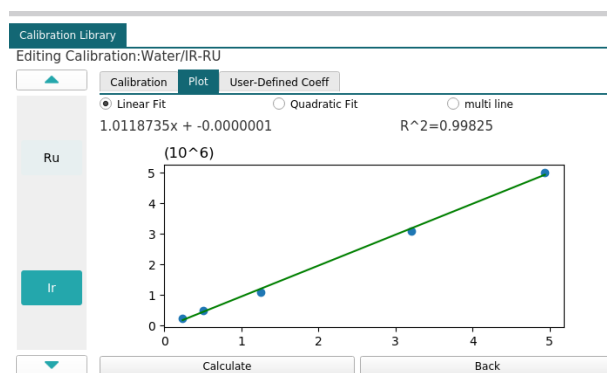


Fuente: Autoría Propia (2025).

Para garantizar la inocuidad del agua generada y prevenir el posible desprendimiento de metales pesados, se revisaron los productos ya generados con un equipo analizador elemental de metales pesados por fluorescencia de rayos x E-MAX. Para esta técnica se revisaron medidas de iridio, rutenio, hierro y Titanio, materiales importantes en la composición de los electrodos. En la figura 12 se aprecia la linealidad de las curvas de calibración utilizadas para dos elementos (Ru y Ir).

Figura 12.

Analizador Elemental E-max Para Detección de Metales Pesados E-MAX.



Nota: Equipo E-max Plus , marca Z-SPEC .Versión Info Serial EM202202070161 , Software Version 859c65b, FirmwareVersion EMAX-ST-1.1.2 , HWVersion 1.5.36.3740 , build Detector Version DP535298-106 , OSVersion Linux-5.4.51-v7+. *Fuente:* Autoría Propia (2025).

Para la detección de los iones cloro generados en estado de cloro libre se procedió a determinar de manera cualitativa con cintas indicadoras de cloro en ppm, tal como se puede visualizar en la figura 13.

Figura 13.

Probador de Cloro Libre en Rango de (0-120) ppm (mg/L).



Nota. Cinta medidoras de cloro libre marca Water Works, rango de Cloro libre 0, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 80, 120 ppm. *Fuente:* Autoría Propia (2025).

Parte Experimental

Para garantizar las medidas entregadas por los equipos se revisaron los parámetros de desviación estándar (SD) y porcentaje de desviación estándar (RDS) frente a estándares de calibración, obteniendo el resumen de los resultados mostrados en la tabla 3, donde se enumeran los resultados para determinar precisión y exactitud de los equipos utilizados en las pruebas.

Tabla 3.

Resumen de Datos Estadísticos de Métodos de Análisis Utilizados en el Proyecto.

Prueba	Observación	R2	%RSD Rango 1	%RSD Rango 2	%RSD Rango 3	%RSD Rango 4	%RSD Rango 5	Número Repeticio nes
Concentraci ón de la sal	En agua destilada	0.991	2.09%	1.86%	1.58%	0.56%	0.31%	5
pH	En agua destilada y buffer de calibración	0.998	1.14%	1.00%	1.10%	0.94%	0.35%	5
Temperatura	agua de la llave Ajustada con aire acondicionad o. Se utilizó termometro de mercurio con incertidumbre de +/- 0.1 C	No aplica	0.6%	0.63%	No medido	No medido	No medido	5
Concentraci ón Hierro		0.968	1.36%	3.95%	1.2%	3.75%	4.56%	5
Concentraci ón Titanio		0.929	7%	8.38%	2.98%			5
Concentraci ón de Rutenio		0.999	5.84%	2.05%	1.69%	1.24%	0.65%	5
Concentraci ón de Iridio		0.998	19.42%	5.66%	3.39%	1.80%		5
Rango de cloro libre	No aplica al ser análisis cualitativo de rango de concentración							0

Nota. Datos observados en 5 rangos de concentración con 5 repeticiones en cada caso para pruebas con concentración de la sal, pH, temperatura, concentración del hierro, concentración de titanio, Rutenio e Iridio en ppm. *Fuente:* Autoría Propia (2024).

Para complementar la información estadística de la tabla 3, se puede buscar en los apéndices de A al H información más explícita, sobre promedios, desviaciones estándar, rangos (del 1 al 5), de las soluciones y estándares utilizados para validar cada método de análisis

Este proyecto se propuso sobre el mismo prototipo, dos configuraciones de uso que se diferencian así: el primero funciona como un reactor tubular de flujo continuo, sobre el cual hay una corriente que pasa sobre los electrodos que aprovechan la presión del flujo para hacer la separación y evitar la mezcla de los productos formados en cátodo y ánodo. El segundo por medio de una tela cerrada que también fue usada en la primera configuración, pero permite la conexión electrolítica entre los electrodos que impiden la mezcla de los productos formados en ambos.

Las variables independientes en el proceso son: voltaje, concentración de la sal y tiempo de residencia. Para seleccionar las variables de proceso fue realizada una revisión bibliográfica comparativa de diferentes metodologías tomando en cuenta el estado del arte y la tabla resumen con variables de estudios previos (Tabla No.1). De esta, se tiene una variedad de voltajes y amperios que lograron diferentes resultados en condiciones diversas de tipos de reactores.

Para iniciar las pruebas y lograr la concentración óptima, pero sosteniendo condiciones seguras para los electrodos, se inició con valores de voltaje no mayores a 10 voltios, como se resumen en la tabla 4.

Tabla 4.

Resumen de Variables Independientes Según Número de Ensayos.

Ensayo	Voltaje(V)	Concentración de la Sal	Tipo de reactor	Tiempo de residencia (Segundos)	Volumen (Litros)
1	3.2	0.18%	Reactor estacionario	60	0.5
2	3.2	0.35%	Reactor estacionario	29	0.5
3	3.2	0.65%	Reactor estacionario	29	0.5
4	3.2	0.90%	Reactor estacionario	30	0.5
5	3.2	1.20%	Reactor estacionario	30	0.5
6	5	0.18%	Reactor estacionario	29	0.5
7	5	0.43%	Reactor estacionario	29	0.5
8	5	0.70%	Reactor estacionario	27	0.5
9	5	0.90%	Reactor estacionario	28	0.5
10	5	1.00%	Reactor estacionario	28	0.5
11	5.6	4.00%	Reactor estacionario	30	0.5
12	7	1.00%	Reactor estacionario	22	0.5
13	10	0.86%	Reactor Tubular de flujo continuo	150	19.8
14	10	0.86%	Reactor Tubular de flujo continuo	158	19.8
15	10	0.86%	Reactor Tubular de flujo continuo	152	19.8

Fuente: Autoría Propia (2024).

De la tabla 4 es importante resaltar que los ensayos funcionaron bajo dos regímenes de alimentación de flujo que se detallarán en la sección de resultados y análisis.

Finalmente, un análisis de costo de cloro libre producido vs costo en Pesos de producción se planteó para definir el ensayo con mejor costo beneficio, el cual se calcula tomando en cuenta los siguientes parámetros; costo del agua, precio de la sal (NaCl), costo mano de obra, depreciación del equipo. Estos valores se tomaron con base en costos locales de la ciudad de Cali.

Resultados y Análisis

Relación Entre Variables Observadas para 15 Ensayos

Del ensayo 1 al 12, el reactor funcionó como reactor estacionario. Del ensayo 13 al 15 este funcionó como reactor continuo obteniendo los resultados que se resumen en la tabla 5. Para calcular el potencial que se tiene de formación de cloro, se calculó de forma teórica tomando la ecuación de Faraday, ecuación 6, así:

Dado que 1 coulomb = 1 ampere. Segundo, entonces para el primer valor de la tabla, que es 0.1 Ampere (60 segundos) se tendría una producción de HOCl de:

$$\text{coulombs} = \text{ampere} \times \text{tiempo} = 0.1 \times 60 = 6 \text{ Culombios} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Teniendo en cuenta que por medio de la ecuación 1 se puede observar que se requieren 2 electrones para la producción de cloro libre, se calculó el cloro teórico para cada uno de los ensayos, para el caso del primer ensayo se realiza el siguiente procedimiento:

$$\frac{6 \text{ Culombios}}{0.5L} \times \frac{1 \text{ mol Electrones}}{96500 \text{ Culombios}} \times \frac{1 \text{ mol Cl}_2}{2 \text{ mol electrones}} \times \frac{1 \text{ mol HOCl}}{1 \text{ mol Cl}_2} \times \frac{52.46 \text{ g HOCl}}{1 \text{ mol HOCl}} \times \frac{1000 \text{ mg HOCl}}{1 \text{ g HOCl}} = 3.26 \text{ ppm HOCl}$$

De esta manera se procedió con todos y cada uno de los valores experimentales de cloro libre del ensayo hasta el 12 de la tabla 5 para la columna de cloro teórico.

Tabla 5.

Resultados Obtenidos Para los 15 Ensayos.

Ensayo	voltaje(V)	Concentración de la Sal	Tipo de reactor	Tiempo de residencia (Segundos)	Ampere	Cloro Teórico	Rango cloro experimental observado
1	3.2	0.18%	Reactor estacionario	60	0.1	3.26	2-5
2	3.2	0.35%	Reactor estacionario	29	0.22	3.47	2-5
3	3.2	0.65%	Reactor estacionario	29	0.39	6.15	5-10

Ensayo	voltaje(V)	Concentración de la Sal	Tipo de reactor	Tiempo de residencia (Segundos)	Ampere	Cloro Teórico	Rango cloro experimental observado
4	3.2	0.90%	Reactor estacionario	30	0.52	8.48	5-10
5	3.2	1.20%	Reactor estacionario	30	0.74	12.07	10-20
6	5	0.18%	Reactor estacionario	29	0.51	8.04	5-10
7	5	0.43%	Reactor estacionario	29	1.1	17.34	10-20
8	5	0.70%	Reactor estacionario	27	1.72	25.25	20-30
9	5	0.90%	Reactor estacionario	28	2.2	33.49	30-40
10	5	1.00%	Reactor estacionario	28	3	45.66	40-80
11	5.6	4.00%	Reactor estacionario	30	10	163.09	Mucho cloro, sin rango disponible (mayor de 120 ppm)
12	7	1.00%	Reactor estacionario	22	6	71.76	40-80
13	10	0.86%	Reactor Tubular de flujo continuo	150	Variable	19.63	5-10 ppm
14	10	0.86%	Reactor Tubular de flujo continuo	158	Variable	19.52	5-10 ppm
15	10	0.86%	Reactor Tubular de flujo continuo	152	Variable	18.34	5-10 ppm

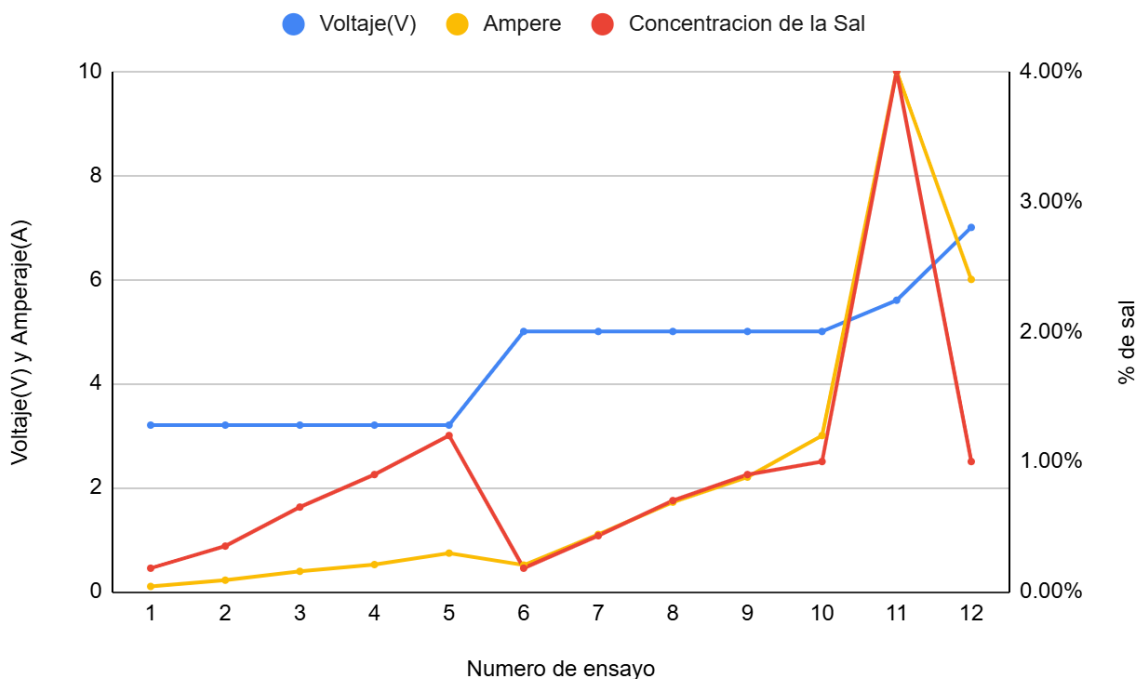
Nota. El cloro teórico tiene un componente experimental ya que se relaciona con el valor de amperaje tomado en el momento con la fuente de alimentación. Temperatura al ingreso del electrodo flujo F1 de 29 °C. *Fuente:* Autoría Propia (2025).

Relación Entre Variables Observadas en Régimen Estacionario (12 Ensayos)

En la Figura 14 se puede ver la relación entre voltaje, amperaje y concentración de la sal para los ensayos que fueron realizados bajo el régimen estacionario.

Figura 14.

Relación Entre Voltaje, Amperaje y Concentración de la Sal.



Nota. La figura muestra la respuesta entre el aumento de amperaje (A) y las variables independientes de voltaje y concentración de la sal. *Fuente:* Autoría Propia (2024).

En la figura 14 se puede evidenciar como los amperes están relacionados directamente con la concentración de la sal y con el voltaje, teniendo en cuenta que los amperes son una variable dependiente y tanto voltaje como concentración de la sal hacían parte de las variables que se manipularon a consideración del proyecto. Es de resaltar que el aumento de voltaje permite tener mayor amperaje y según la ley de Faraday esto se traduce en mayor reacción, por ende, en una mayor eficiencia en el proceso.

El aumento de la concentración de la sal también generó un mayor valor de amperaje bajo las mismas condiciones de voltaje como se puede apreciar claramente la figura 14 en los

ensayos 1 y 6 ambos con concentración de 0.18% determinando un incremento de amperaje 80.39%, el incremento del amperaje se calcula con la ecuación 19, así:

$$\text{Incremento amperaje} = \left(\frac{\text{Valor menor}}{\text{Valor mayor}} - 1 \right) \times 100\% \quad (\text{Ecuación 19})$$

$$\text{Incremento amperaje} = \frac{0.1}{0.51} = 80.39\%$$

La figura 14 también muestra una relación lineal entre sal y concentración para ambos: rango de voltaje de 3.2 Voltios para ensayos del 1 al 6, y rango de 5 voltios para ensayos del 7 al 11. Esta relación lineal fue comprobada por el cálculo de valor R2 mediante la ecuación 20, y usando fórmula en Excel para el cálculo.

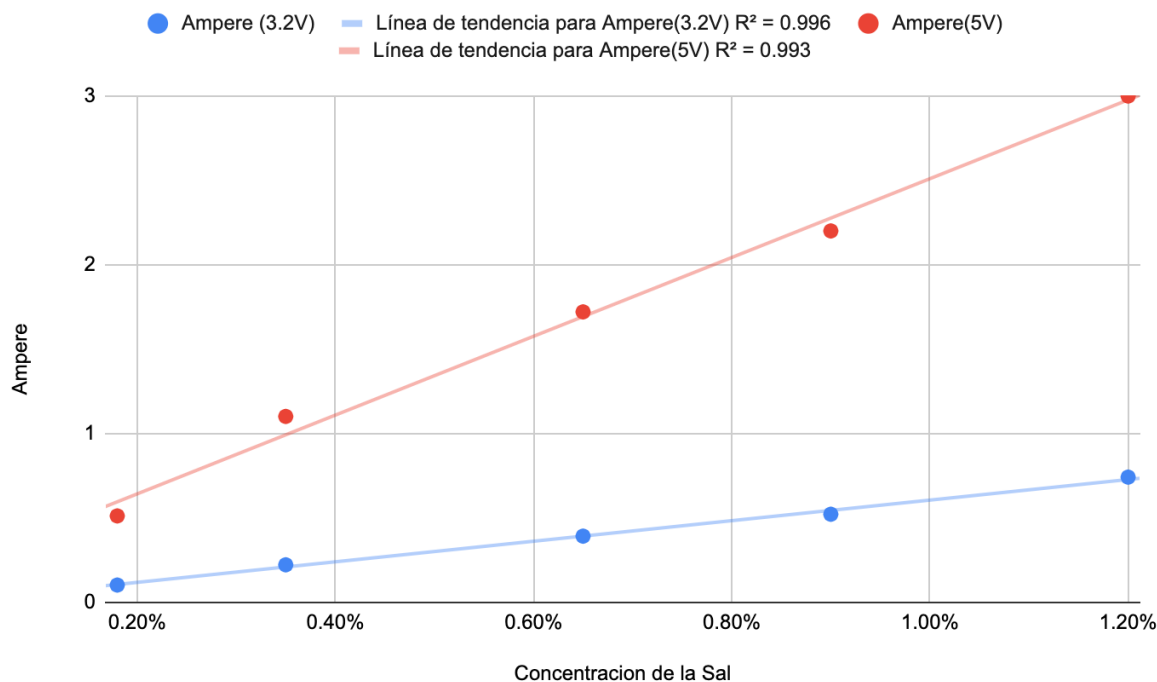
$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^T (\hat{Y}_t - \underline{y})}{\sum_{t=1}^T (Y_t - \underline{Y})^2} \quad (\text{Ecuación 20})$$

$$R^2 = 0.996$$

El valor de R2 de 0.996 indica que aproximadamente el 99.6% de la variabilidad en Ampere puede ser relacionada con la variación en la concentración de la sal. Esto sugiere un ajuste muy preciso del modelo de regresión lineal a los datos, y por ende una prueba de que el prototipo es estable en cortos periodos de tiempo, como lo muestra la figura 15, para una relación lineal entre Amper vs respuesta a cambios de sal y voltaje. La Figura 15 también presenta la relación lineal entre amperaje y concentración de la sal para los dos valores de voltaje de 3.2 y 5 Voltios.

Figura 15.

Relación Lineal de Amperaje y Concentración de la Sal a Dos Valores de Voltaje (3.2V y 5V).



Nota. Relación lineal y respuesta entre amperaje y concentración de la sal para voltaje de 5 voltios y 3.2 voltios. *Fuente:* Autoría Propia (2025).

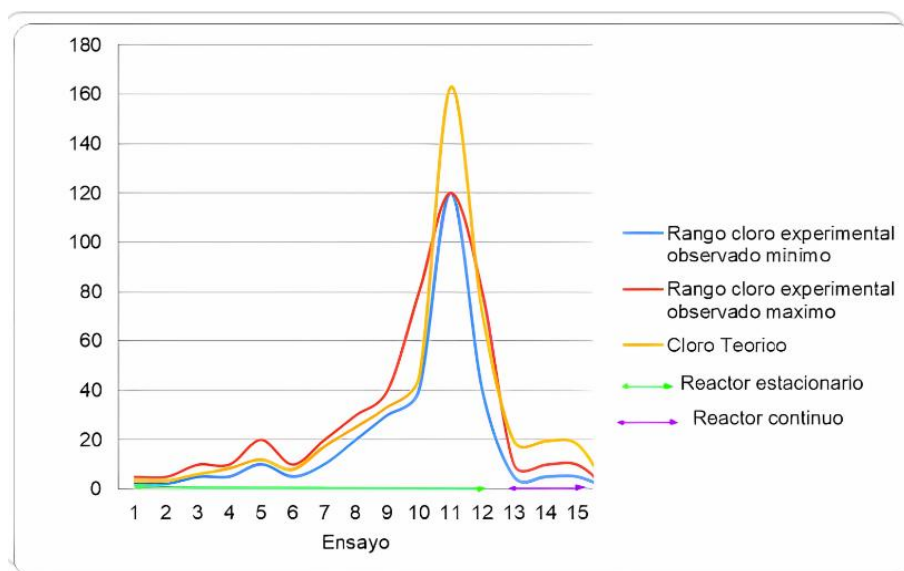
Teniendo en cuenta que los valores mostrados para cloro experimental hacen parte de una prueba subjetiva, es decir que busca determinar la presencia de la especie cloro mas no cuantificar de una forma precisa, se presentan los resultados en los rangos mínimos y máximos que se asociaron en cada prueba a la lectura de la cinta. Dado que estos valores son subjetivos y existe alta probabilidad de error por parte del observador, se ponen de manera asociativa a un rango, pero no se realiza un manejo estadístico con los mismos por la naturaleza del análisis.

En la Figura 16 se presentan los rangos de cloro máximo y mínimos obtenidos en el experimento en estado estacionario, así como los rangos de cloro teóricos. Como se puede notar en la figura 16 si bien no hay una precisión absoluta de los datos, si se puede apreciar una armonía

entre el rango que se determinó experimental y el cálculo teórico. La diferencia en su mayoría puede ser atribuible a la resistencia óhmica, la cual genera un consumo de energía que no se aprecia en producción de ácido hipocloroso. También la subjetividad de la prueba genera un rango de error considerable, que como se puede apreciar aumenta para la técnica a partir de los ensayos 10 y 12, en los cuales los rangos mínimos y máximos van de 40 ppm hasta 80 ppm de cloro libre.

Figura 16.

Rango Cloro Experimental Observado Mínimo, Rango Cloro Experimental Observado Máximo y Cloro Teóricos.



Fuente: Autoría Propia (2025).

Relación Entre Variables Observadas Para Reactor de Flujo Continuo (3 Ensayos)

En la segunda parte de la investigación se trabajó el prototipo como reactor de flujo continuo (los ensayos 13, 14 y 15). Lo anterior se realizó fijando las siguientes condiciones: no variar la concentración de sal, lo que fue logrado sosteniendo siempre un voltaje de 10 voltios a una concentración de 8600 ppm, se realizaron 3 ensayos en los cuales se obtuvieron los resultados que son presentados en la tabla 6, cada ensayo tuvo su respectivo duplicado. Las

lecturas del 1 al 12 corresponden a un momento de tiempo relacionado con la medición observada en ese instante (t) en la fuente de energía continua CC.

Tabla 6.

Valores Observados en el Instante de Tiempo VS Amperaje Observado en Fuente Corriente Continua.

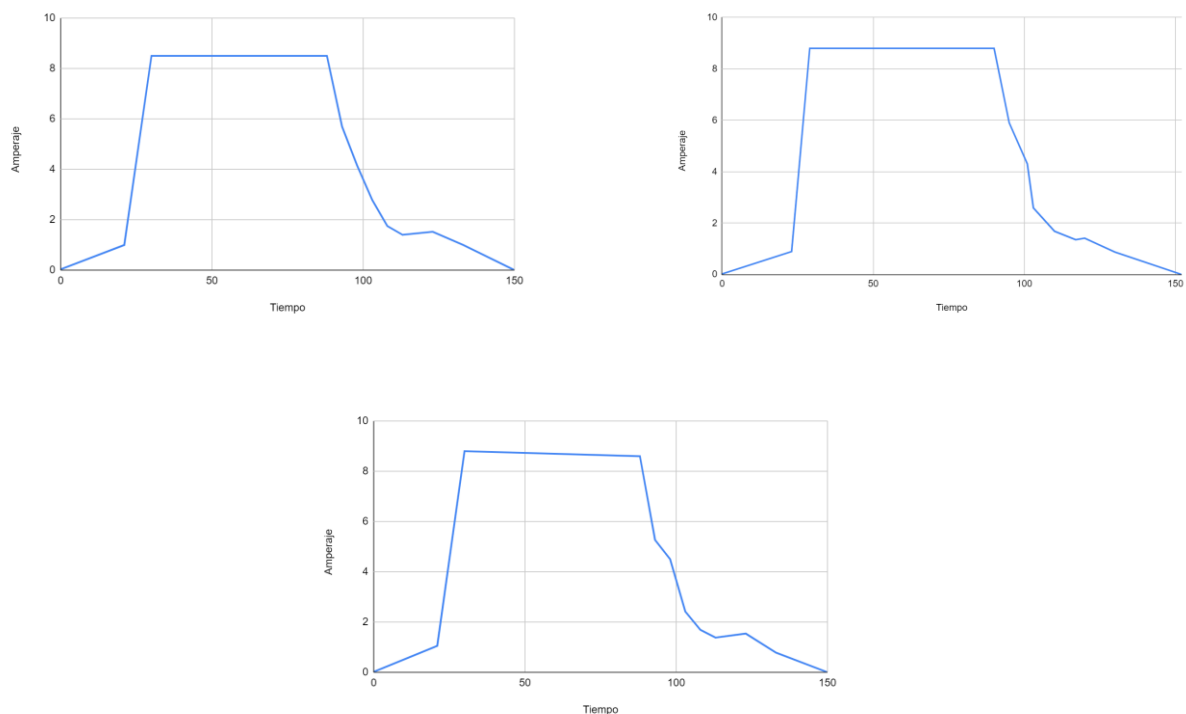
Ensayo 13			Ensayo 14			Ensayo 15		
Lectura	Tiempo	Amperaje	Medición	Tiempo	Amperaje	Medición	Tiempo	Amperaje
1	0	0.03	1	0	0.02	1	0	0.02
2	21	0.995	2	23	0.89	2	21	1.05
3	30	8.5	3	29	8.8	3	30	8.8
4	88	8.5	4	90	8.8	4	88	8.6
5	93	5.7	5	95	5.9	5	93	5.27
6	98	4.15	6	101	4.3	6	98	4.5
7	103	2.78	7	103	2.59	7	103	2.42
8	108	1.75	8	110	1.68	8	108	1.69
9	113	1.4	9	117	1.35	9	113	1.38
10	123	1.52	10	120	1.41	10	123	1.54
11	133	1	11	130	0.87	11	133	0.78
12	150	0	12	158	0	12	150	0

Fuente: Autoría Propia (2025).

Las gráficas de cada una de las curvas de los ensayos de régimen continuo son presentadas en la figura 17, en la cual se observa un rápido ascenso del amperaje los primeros 25 segundos, una meseta en la cual se estabiliza (aproximadamente a 8.5 amp) y un descenso irregular del mismo. En la Figura 18 se aprecia el resultado (aproximadamente a 8.5 amp) en el montaje llevado a cabo.

Figura 17.

Variación del Amperaje con el Tiempo en los 3 Ensayos Realizados del Régimen Continuo, con Concentración de Sal de 0.86% y Voltaje Inicial de 10 Voltios.



Fuente: Autoría Propia (2025).

Figura 18.

Resultados de la Variación del Amperaje con el Tiempo en el Montaje Experimental.



Fuente: Autoría Propia (2025).

Para determinar el cloro teórico en este caso, en donde los amperajes claramente son variables en el tiempo y no permanecen de forma constante como cuando funcionaba de forma estacionaria, se requiere de hacer un cálculo del área bajo la curva formada. Teniendo en cuenta que la ecuación de la curva es desconocida se procede con la metodología de cálculo del área bajo la curva por aproximación en el punto medio (Hughes-Hallett, et al., 2005).

Para lo cual se dice tiene la siguiente ecuación:

$$\int_a^b f(x) \cdot dx \approx \sum_{i=1}^n f(x) \Delta x \quad (\text{Ecuación 21})$$

Donde $f(x)$ =Función amperaje

dx =Derivada de amperaje

Δx = Diferencia entre valores de tiempo entre dos puntos.

$$\int_a^b f(x) \cdot dx$$

Para efectos del proyecto, calcular el área bajo la curva es equivalente a calcular los culombios (C) totales que se generan en el reactor al paso de los aproximadamente 19 litros de agua con sal. Estos culombios son muy relevantes y con la ecuación de Faraday se puede calcular de forma teórica el cloro generado. Se realizaron los cálculos con la ecuación para cada uno de los ensayos, los cuales se muestran en la tabla 7.

Tabla 7.

Valores Tabulados Para Cálculo del Área Bajo la Curva de los Ensayos a Régimen Continuo.

Ensayo 1			Ensayo 2			Ensayo 3		
Δx	Promedio y	Área del punto	Δx	Promedio y	Área del punto	Δx	Promedio y	Área del punto
21.00	0.51	10.76	23.00	0.46	10.47	21.00	0.54	11.24
9.00	4.75	42.73	6.00	4.85	29.07	9.00	4.93	44.33
58.00	8.50	493.00	61.00	8.80	536.80	58.00	8.70	504.60
5.00	7.10	35.50	5.00	7.35	36.75	5.00	6.94	34.68
5.00	4.93	24.63	6.00	5.10	30.60	5.00	4.89	24.43
5.00	3.47	17.33	2.00	3.45	6.89	5.00	3.46	17.30
5.00	2.27	11.33	7.00	2.14	14.95	5.00	2.06	10.28
5.00	1.58	7.88	7.00	1.52	10.61	5.00	1.54	7.68
10.00	1.46	14.60	3.00	1.38	4.14	10.00	1.46	14.60
10.00	1.26	12.60	10.00	1.14	11.40	10.00	1.16	11.60
17.00	0.50	8.50	28.00	0.44	12.18	17.00	0.39	6.63
-150.00	0.00	0.00	-158.00	0.00	0.00	-150.00	0.00	0.00

Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
Total	678.84	Total	703.85	Total	687.34

Nota. Valores de culombios calculados a partir de amperaje y el tiempo de la electrólisis. Para cada prueba los volúmenes de agua recolectados en salida (ánodo) variaron así; 9.4 Litros, 9.9 Litros y 10.2 litros, a T de 29 °C todos los ensayos. *Fuente:* Autoría Propia (2025).

De la tabla 7 se puede observar que el promedio de los 3 ensayos es 690.01 C. Teniendo en cuenta que por medio de la ecuación 1 se puede observar que se requieren 2 electrones para la producción de cloro libre se tiene que:

$$\frac{690.01C}{9.4L} \times \frac{1 \text{ mol Electrones}}{96500 C} \times \frac{1 \text{ mol } Cl_2}{2 \text{ mol electrones}} \times \frac{1 \text{ mol } HOCl}{1 \text{ mol } Cl_2} \times \frac{52.46 \text{ g } HOCl}{1 \text{ mol } HOCl} \times \frac{1000 \text{ mg } HOCl}{1 \text{ g } HOCl} = 19.63 \text{ ppm } HOCl$$

De la misma forma se calculó el cloro teórico para los 2 ensayos restantes, los cuales fueron 19.53 y 18.34 ppm HOCl, tal y como se presentan en la tabla 8.

Tabla 8.

Resultado de Cloro Libre Experimental y Cloro Libre Teórico Para Configuración Reactor

Continuo.

Ensayo	voltaje(V)	Concentración de la Sal	Tipo de reactor	Tiempo de residencia (Segundos)	Ampere	Cloro Teórico	Rango cloro experimental observado
13	10	0.86%	Reactor Tubular de flujo continuo	150	Variable	19.63	5-10 ppm
14	10	0.86%	Reactor Tubular de flujo continuo	158	Variable	19.52	5-10 ppm
15	10	0.86%	Reactor Tubular de flujo continuo	152	Variable	18.34	5-10 ppm

Fuente: Autoría Propia (2025).

Teniendo en cuenta los 3 valores obtenidos en la tabla 8 para cloro libre teórico, con configuración del prototipo funcionando en forma continua, se procedió a calcular el siguiente promedio:

$$\underline{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \textit{Promedio cloro libre para Prototipo de forma continua.}$$

$$\begin{aligned} \textit{Promedio cloro libre para Prototipo de forma continua} &= \left(\frac{19.63 + 19.52 + 18.34}{3} \right) \\ &= 19.16\textit{ppm} \end{aligned}$$

Cabe resaltar que el valor obtenido con las cintas de cloro libre de forma experimental fue de 5-10 ppm encontrando al menos una diferencia muy representativa por debajo del promedio mencionado.

Para el reactor estacionario se procedió a calcular el pH inicial del agua antes de la electrólisis, y después de la electrólisis, en la mezcla que contiene ambos lados de la electrólisis, obteniendo los valores resumidos en la tabla 9.

Dado que el pH es una consecuencia de la cantidad de electrólisis y depende mucho de la cantidad del ácido hipocloroso formado, se determinaron los cambios de pH para los ensayos del 9 al 13, teniendo en cuenta que para estos un cambio entre pH inicial y pH final es considerablemente más grande que el valor de porcentaje de variación RSD encontrado y reportado en la tabla 3.

Tabla 9.

Control de Variación de pH Inicial y pH de la Mezcla en Ensayos de 9 al 13.

Ensayo	Voltaje (V)	Tipo de reactor	Tiempo de residencia (Segundos)	pH Inicial (unidades)	pH Final Mezcla (unidades)	pH Ánodo	% variación pH Inicial y Final	% variación ánodo y pH inicial
9	5	Reactor estacionario	27	7.25	7.29	3.21	0.55%	-55.72%
10	5	Reactor estacionario	28	7.38	7.44	2.96	0.81%	-59.89%
11	5	Reactor estacionario	28	7.43	7.69	3.4	3.50%	-54.24%
12	5.6	Reactor estacionario	15	7.43	7.94	2.7	6.86%	-63.66%
13	7	Reactor estacionario	22	7.32	7.67	3.3	4.78%	-54.92%

Nota. Ensayos seleccionados para seguimiento del pH. *Fuente:* Autoría Propia (2025).

El porcentaje de variación de pH se determinó así:

$$\%Variación = \frac{(pH \text{ Mezcla} - pH \text{ inicial})}{pH \text{ Inicial}} \quad (\text{Ecuación 22})$$

Por lo tanto, en el ensayo 9 la variación sería así:

$$\%Variación = \frac{(7.29 - 7.25)}{7.25} \times 100 = 0.55\%$$

De la misma manera se procedió con el cálculo de todas las variaciones mostradas en la tabla 9. Para tener una idea de la tasa de producción del ácido hipocloroso, o tasa de reacción se utilizó la ecuación 5 presentada en este documento, la cual a partir de la densidad de corriente permitió conocer los $\text{mol} \cdot \text{S}^{-1} \text{cm}^2$ así:

$$Tasa (mol s^{-1} cm^{-2}) = \frac{i}{nFA} = \frac{j}{nF}$$

Donde:

i = Ampere(coulomb/s) =?

j = Densidad de Corriente A/cm²=?

n = estequiometría de electrones=2

F = Constante de Faraday 96500 Culombios /mol

Para el primer ensayo se tiene que:

$$j = \frac{\text{Ampere}}{\text{Área electrodo}}$$

Si se toma el valor de área de la malla del electrodo calculada previamente de 55.4cm², se tiene lo siguiente:

$$j = \frac{\text{Ampere}}{\text{Área electrodo}} = \frac{0.1\text{ampere}}{55.4\text{cm}^2} = 0.0018 \text{ A/cm}^2$$

Para lo cual se tendría una tasa de:

$$Tasa (mol s^{-1} cm^{-2}) = \frac{j}{nF} = \frac{0.0018\text{A/cm}^2}{2 \times 96500 \text{ A.S}^{-1}/\text{mol}} = 9.35 \times 10^{-9}$$

De igual forma se procedió con todos y cada uno de los valores expresados en la tabla 10 para los ensayos

Tabla 10.

Tasa de Producción Mol. s-1 cm-2 Para Descripción de la Capacidad de Cada Ensayo Según Condiciones de Voltaje y Concentración de la Sal.

Ensayo	Voltaje(V)	Concentración de la Sal	Tipo de reactor	Tiempo de residencia (Segundos)	Ampere/cm ²	Tasa (mol s-1 cm-2)
1	3.2	0.18%	Reactor estacionario	60	0.0018	9.35×10^{-9}
2	3.2	0.35%	Reactor estacionario	29	0.0040	2.06×10^{-8}

Ensayo	Voltaje(V)	Concentración de la Sal	Tipo de reactor	Tiempo de residencia (Segundos)	Ampere/cm 2	Tasa (mol s-1 cm-2)
3	3.2	0.65%	Reactor estacionario	29	0.0070	3.65×10^{-8}
4	3.2	0.90%	Reactor estacionario	30	0.0094	4.86×10^{-8}
5	3.2	1.20%	Reactor estacionario	30	0.0134	6.92×10^{-8}
6	5	0.18%	Reactor estacionario	29	0.0092	4.77×10^{-8}
7	5	0.43%	Reactor estacionario	29	0.0199	1.03×10^{-7}
8	5	0.70%	Reactor estacionario	27	0.0310	1.6×10^{-7}
9	5	0.90%	Reactor estacionario	28	0.0397	2.06×10^{-7}
10	5	1.00%	Reactor estacionario	28	0.0542	2.81×10^{-7}
11	5.6	4.00%	Reactor estacionario	30	0.1805	9.35×10^{-7}
12	7	1.00%	Reactor estacionario	22	0.1083	5.61×10^{-7}
13	10	0.86%	Reactor Tubular de flujo continuo	150	0.0817	4.23×10^{-7}
14	10	0.86%	Reactor Tubular de flujo continuo	158	0.0804	4.17×10^{-7}
15	10	0.86%	Reactor Tubular de flujo continuo	152	0.0816	4.23×10^{-27}

Fuente: Autoría Propia (2025).

Una vez se obtuvieron los flujos de salida del cátodo y ánodo F3 y F4, se mezclaron para hacer un análisis elemental de metales tales como: Iridio, Rutenio, Hierro y Titanio, bajo el supuesto de que por la electrólisis se puede generar desprendimiento de los elementos de estudio de la superficie del ánodo. Aunque no era de interés de este estudio se decidió que era fácil determinarlos por la disponibilidad del equipo, pues estos son los metales que están en el ánodo (en contextos industriales y tecnológicos). Los resultados obtenidos se analizaron a 200 segundos en equipo de fluorescencia de rayos x monocromática E-MAX y se presentan a continuación en la tabla 11.

Tabla 11.

Mediciones Observadas Para Concentración de Iridio, Rutenio, Hierro y Titanio por Medio

Equipo E. Max en Mezcla de Flujo F3 y F4 Usando Equipo MXRF.

Ensayo	Voltaje (V)	Concentración de la Sal	Tipo de reactor	Tiempo de residencia (Segundos)	Concentración Hierro ppm	Concentración Titanio ppm	Concentración Iridio ppm	Concentración Rutenio ppm
1	3.2	0.18%	Reactor estacionario	60	0	0	0	0
2	3.2	0.35%	Reactor estacionario	29	0	0	0	0
3	3.2	0.65%	Reactor estacionario	29	0	0	0	0
4	3.2	0.90%	Reactor estacionario	30	0	0	0	0
5	3.2	1.20%	Reactor estacionario	30	0	0	0	0
6	5	0.18%	Reactor estacionario	29	0	0	0	0
7	5	0.43%	Reactor estacionario	29	0	0	0	0
8	5	0.70%	Reactor estacionario	27	0	0	0	0
9	5	0.90%	Reactor estacionario	28	0	0	0	0
10	5	1.00%	Reactor estacionario	28	0	0	0	0
11	5.6	4.00%	Reactor estacionario	30	0	0	0	0
12	7	1.00%	Reactor estacionario	22	0	0	0	0
13	10	0.86%	Reactor Tubular de flujo continuo	150	0	0	0	0

Ensayo	Voltaje (V)	Concentración de la Sal	Tipo de reactor	Tiempo de residencia (Segundos)	Concentración Hierro ppm	Concentración Titanio ppm	Concentración Iridio ppm	Concentración Rutenio ppm
14	10	0.86%	Reactor Tubular de flujo continuo	158	0	0	0	0
15	10	0.86%	Reactor Tubular de flujo continuo	152	0	0	0	0

Nota. Se determinaron valores para entrada F1 y salida F3+F4, dando cero ppm en todos los casos. *Fuente:* Autoría Propia (2025).

Revisión Económica del Estudio

En este punto se analizaron los factores que se consideraron más importantes y que impactan el funcionamiento del prototipo como costos fijos. Para calcular los costos, se tomaron datos de las empresas públicas de Cali (EMCALI EICE ESP) asumiendo estrato 3, en donde el costo del agua por metro cúbico fue de \$ 1829,48 COP, el costo de la sal 5000 COP /Kg de sal y el costo de energía eléctrica fue de \$ 737,6 COP Kwh.

Para calcular el costo de la sal se procedió así:

$$0.5 \text{ L Solución} \times \frac{0.18 \text{ g Sal}}{0.1 \text{ L Solución}} \times \frac{5000 \text{ COP}}{1000 \text{ g Sal}} = \$ 4.5 \text{ COP} \quad (\text{Ecuación 23})$$

El costo del agua sería así:

$$0.5 \text{ L Agua} \times \frac{1829,48 \text{ COP}}{1000 \text{ L}} = \$0.91 \text{ COP} \quad (\text{Ecuación 24})$$

El costo de la energía se calcula obteniendo la potencia:

$$\begin{aligned} \text{Potencia} &= \text{Voltios} \times \text{amperaje} \quad (\text{Ecuación 25}) \\ &= 3.2 \text{ V} \times 0.1 \text{ ampere} = 0.32 \text{ W} \end{aligned}$$

Si se usa el prototipo por 60 segundos, y reemplazando en el primer ensayo se tiene que:

$$60 \text{ s} \times \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ s}} \times \frac{737,6 \text{ cop}}{1 \text{ hora. Kw}} \times \frac{1 \text{ Kw}}{1000 \text{ w}} \times 0.32 \text{ w} = \$0.00393 \text{ COP} \quad (\text{Ecuación 26})$$

El costo de mano de obra se calculó de la siguiente manera: se asume un salario mínimo incluido prestaciones legales mensuales de \$ 2,500,000 COP, asumiendo que por este costo se trabaja 190 horas al mes, equivalente a 684000 segundos. Para cada caso, se coloca al menos el doble del tiempo que toma cada electrolisis, asumiendo que la preparación va a tomar algo de tiempo, se tiene que:

$$2 \times 60 \text{ segundo cada ensayo} \times \frac{\$2,500,000 \text{ COP}}{684000 \text{ Segundos}} = \$438.6 \text{ COP} \quad (\text{Ecuación 27})$$

Para el componente de mantenimiento y reparación se le sumaron los valores de la tabla 2 que corresponden a 25% los materiales y equipos de la propuesta que no hacen parte de componentes del prototipo propiamente como; software y equipos, talento humano, servicios públicos, entre otros. Sobre la base de \$1,595,000 COP, se estima que un 25% de ese valor se destine para reparaciones y mantenimiento por año, es decir aproximadamente un valor de 1095 COP por día. Si se estima un uso de 4 veces al día este componente bajaría hasta 273 COP por lote. Una vez fueron calculados todos los componentes se procedió a organizar la información en la tabla 12.

Tabla 12.

Ponderación de los Principales Costos de la Producción de Cloro Libre por Medio del Prototipo Para Cada Ensayo.

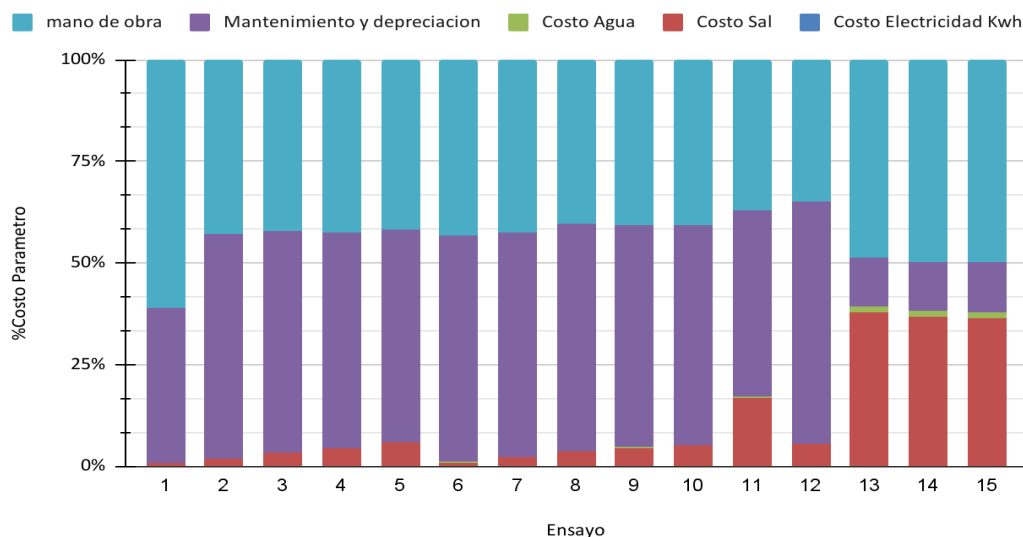
Ensayo	Costo Electricidad ad Kwh	Costo Sal	Costo Agua	Mantenimiento y depreciación	Mano de obra	Total, por Prueba	COP/p pm Cloro
1	0.003934	4.50	0.91	273.0	438.6	717.0	19.9
2	0.004183	8.75	0.91	273.0	212.0	494.7	142.6
3	0.007415	16.25	0.91	273.0	212.0	502.2	81.7
4	0.010228	22.50	0.91	273.0	219.3	515.7	60.8
5	0.014555	30.00	0.91	273.0	219.3	523.2	43.3
6	0.015152	4.50	0.91	273.0	212.0	490.4	61.0
7	0.032680	10.75	0.91	273.0	212.0	496.7	28.6
8	0.047575	17.50	0.91	273.0	197.4	488.8	19.4
9	0.063106	22.50	0.91	273.0	204.7	501.2	15.0
10	0.086053	25.00	0.91	273.0	204.7	503.7	11.0
11	0.344213	100.00	0.91	273.0	219.3	593.6	3.6
12	0.189317	25.00	0.91	273.0	160.8	459.9	6.4
13	0.039953	851.40	36.22	273.0	1096.5	2257.2	115.0
14	0.042084	851.40	36.22	273.0	1155.0	2315.6	118.6
15	0.037372	808.40	34.39	273.0	1111.1	2226.9	121.4

Nota. Para el mantenimiento y depreciación se asume un 25% del valor total del prototipo por año, asumiendo un uso diario de 4 veces en cualquiera de las configuraciones analizadas. *Fuente:* Autoría Propia (2025).

De los componentes de mantenimiento y depreciación junto con el costo de mano de obra, que son mostrados en la figura 19, es importante resaltar que son los mayores costos fijos para producción de ácido hipocloroso de este proyecto si se analizan los ensayos del 1 al 12. En los siguientes ensayos (configuración continua), el costo de la sal toma importancia en los últimos 3 ensayos del 13 al 15.

Figura 19.

Ponderación de Costos Para Producción de Ácido Hipocloroso Expresando Porcentaje de Costo por Cada Ensayo.



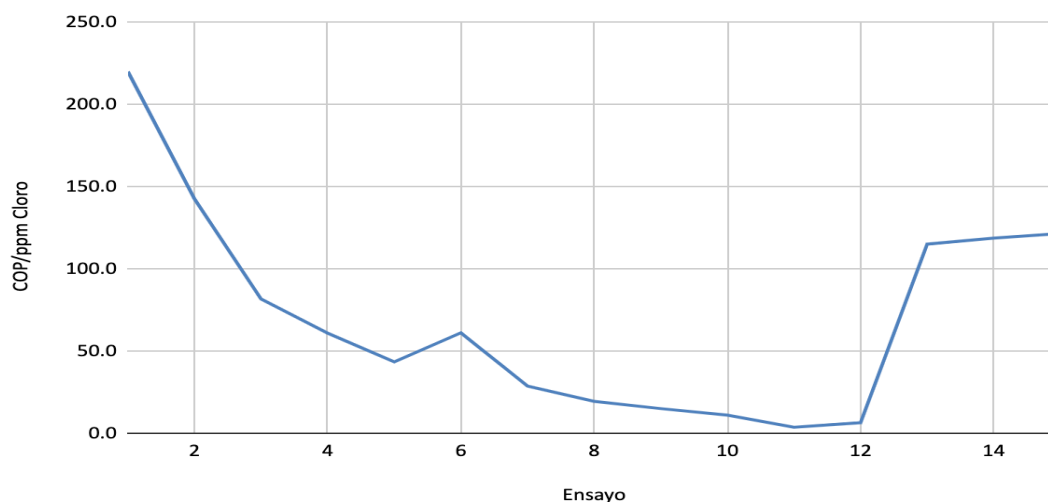
Fuente: Autoría Propia (2025).

En términos económicos los ensayos 11 y 12 tienen el mejor costo beneficio encontrado, como se muestra en la figura 20, ya que con estos se logra generar cloro libre a menor costo en pesos, En la figura 20, en los ensayos 11 y 12 se presenta la mayor cercanía al cero (\$). Es importante mencionar que el ensayo 11 tiene una alta concentración de sal, alrededor de 4%, lo que podría no ser apto para algunas aplicaciones. Contrariamente, el ensayo 12, tiene una concentración de 1% y podría ser considerado más apto. Producir ácido hipocloroso con baja concentración de sal ofrece ventajas significativas: mejora la pureza del producto al reducir subproductos tóxicos como cloratos y trihalometanos, disminuye el impacto ambiental al generar menos efluentes contaminantes, y reduce la corrosión en equipos e infraestructuras, extendiendo su vida útil. Además, es más seguro para la salud pública, ya que resulta menos irritante para la piel y mucosas, y optimiza los costos operativos al requerir menos materia prima y energía

durante su producción. Finalmente, el ensayo 11 superó el límite de concentración detectable según la metodología utilizada para producir cloro libre, teniendo esta como limitante de 120 ppm.

Figura 20.

Gráfica de Costo en Pesos por Cloro Producido.



Nota. Se asume el cloro teórico producido por amperaje y tiempo. *Fuente:* Autoría Propia (2025).

Discusión de Resultados

Los resultados obtenidos en la experimentación revelan una estrecha relación entre el voltaje aplicado, la concentración de sal y el amperaje resultante en el proceso de electrólisis. El aumento del voltaje y la concentración de sal condujo a un incremento en el amperaje, lo que se traduce en una mayor eficiencia en la producción de ácido hipocloroso, respaldando los principios de la ley de Faraday por los cuales se espera que, entre más intensidad de corriente causada por un aumento de voltaje o concentración de electrolito, se genere mayor reacción de producción de ácido hipocloroso y por ende cloro libre. Por ejemplo, al comparar los ensayos 1 y

7, ambos con una concentración de sal de 0.18%, pero con voltajes de 3.2V y 5V respectivamente, se observó un incremento del 80.39% en el amperaje.

El análisis de la configuración del reactor como sistema estacionario y de flujo continuo proporcionó información valiosa sobre la producción de ácido hipocloroso. En el ensayo de régimen estacionario, se observó una relación lineal entre el amperaje y la concentración de sal, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.996, lo que indica la estabilidad del prototipo en condiciones controladas. En el sistema de flujo continuo, la variabilidad del amperaje a lo largo del tiempo requirió un enfoque de cálculo diferente para determinar la producción de ácido hipocloroso, utilizando el área bajo la curva de amperaje-tiempo. El promedio de los tres ensayos realizados en esta configuración fue de 19.16 ppm.

La comparación entre los valores teóricos de producción de ácido hipocloroso, calculados mediante la ley de Faraday, y los rangos experimentales obtenidos mediante cintas indicadoras de cloro, mostró una concordancia general, aunque con algunas diferencias. Por ejemplo, en el ensayo 1, el valor teórico de producción de HOCl fue de 3.26 ppm, mientras que el rango experimental observado fue de 2-5 ppm. Estas diferencias pueden atribuirse a factores como la resistencia óhmica del sistema, producción de reacciones secundarias y la subjetividad inherente a la medición con cintas indicadoras. En el caso del sistema de flujo continuo, la producción teórica de ácido hipocloroso fue de 19.16 ppm, mientras que el rango experimental fue de 5-10 ppm, lo que evidencia una reducción de más de un 50% frente al valor teórico y sumado a los factores anteriores, se agrega la velocidad del flujo que impide una reacción uniforme en la superficie del electrodo, impidiendo así generar un tiempo de residencia suficiente para que se complete la reacción. También se puede inferir que una parte importante de la intensidad de corriente que llega hasta el electrodo no se utiliza para la reacción misma de óxido-reducción de

NaCl en Agua sino en reacciones secundarias de elementos presentes en el agua potable tales como elementos alcalinotérreos, metales pesados en muy baja concentración, entre otros.

La figura 17 muestra una interesante relación de una curva que se podría asociar a tres momentos del reactor. El primero un momento de aumento lineal de la relación tiempo amperaje ocasionado por la posible llegada de sal hasta los electrodos. Una segunda parte relacionada con la estabilización del amperaje y momento, en donde tal vez se logró un equilibrio entre la concentración máxima posible en el seno del electrodo y el flujo. Por último, el tercer parte muestra un decaimiento de la reacción de forma exponencial que demuestra el momento en el cual se inicia con la disminución de la concentración de la sal y una caída en el amperaje. Esta caída muestra la importancia sobre la cual se debe ajustar un cierre rápido de la llave una vez se consume toda la sal por medio del efecto Venturi, para evitar una disminución de la concentración de cloro, dado que como se determinó en las pruebas a partir del segundo 150, la respuesta al amperaje tiende a cero. Cabe resaltar que, en las condiciones de este estudio, este tiempo es variable y siempre se requerirá un ajuste entre la apertura del Venturi y el flujo de agua al momento de la prueba para obtener la solución más concentrada posible, dado que se depende de la presión de la red de agua potable.

De este último punto es importante mencionar que las pruebas realizadas para los elementos hierro, titanio, iridio y rutenio arrojaron que no hubo presencia de los mismos una vez finalizado el proceso de electrólisis, el cual puede ocasionar desprendimiento o aumento de la concentración de los mismos, lo que mostraría en parte la integridad del ánodo bajo las condiciones de voltaje estudiadas y que al menos bajo un límite de cuantificación determinado por la prueba de Análisis elemental MXRF haya la inocuidad del producto formado, a razón de que el electrodo está formado principalmente por estos elementos. Cabe resaltar que esto no

garantiza 100% la inocuidad del producto y futuros análisis bajo límites de cuantificación más bajos deben ser realizados para garantizar por ejemplo su funcionalidad en agua de consumo humano, sin embargo, es un buen comienzo para el uso del agua electrolizada con ácido hipocloroso para aplicaciones de desinfección.

Los pH obtenidos durante las pruebas para los ensayos 11, 12 y 13, son valores esperados en el sentido de que los pH bajos, se generan por la producción de iones Hidronio (H^+), que a su vez son producidos según la ecuación 2 principalmente por la disociación del ácido clorhídrico formado en conjunto con el ácido Hipocloroso, que cabe resaltar tiene una constante de disolución baja. A pesar de esta constante de disolución baja, el hidróxido de sodio formado según la ecuación 4, neutraliza tanto el ácido hipocloroso como el ácido clorhídrico lo cual es coincidente con los valores obtenidos una vez se mezclan los dos flujos de cátodo y ánodo ya que se obtienen valores cercanos a la neutralidad. Si bien existe una diferencia en el pH inicial y el pH de la mezcla que debería ser igual o moverse dentro del %RDS obtenido, se sospecha que la diferencia marcada en el ensayo 11, 12 y 13 con mayor pronunciación en el 12 (6.86%), corresponde a una posible evaporación de cloro en su forma elemental, ya que esta se encuentra de forma gaseosa y es posible que el cloro no reaccione totalmente con el agua y una porción se logre escapar.

Limitaciones del Estudio

El estudio presentó algunas limitaciones que deben ser consideradas al interpretar los resultados. La medición de la concentración de cloro libre mediante cintas indicadoras, aunque útil para una evaluación cualitativa, introdujo un grado de subjetividad y un rango de error considerable, especialmente en concentraciones más altas. La falta de un método cuantitativo

más preciso para medir el ácido hipocloroso limitó la capacidad de establecer relaciones cuantitativas definitivas entre las variables del proceso y la producción real.

Además de lo anterior, el estudio se centró en la producción de ácido hipocloroso en condiciones específicas, y la escalabilidad y aplicabilidad de los resultados a sistemas más grandes y complejos requieren una investigación adicional. Los factores como el rendimiento a diferentes temperaturas y el caudal del reactor pueden influir en la eficiencia del proceso y deben ser explorados en futuros estudios.

Otra limitación para resaltar del estudio es que no fue estudiada una configuración mixta, es decir, con reacciones estacionarias y continuas en simultáneo, que puede ser una buena alternativa para lograr una mayor concentración de cloro, conservando los costos de sal constante y haciendo posible el tratamiento de mayores cantidades de agua.

El estudio económico de la propuesta se basó en condiciones aproximadas de depreciación y mantenimiento de un 25% anual del valor del equipo, pero es requerido a futuro estudios con mayor nivel de detalle en los que se aplique una depreciación más objetiva, como por ejemplo la que plantea Burstein (2005), en donde la aplicación de la ecuación de Tafel permite también determinar las tasas de corrosión a partir de métodos de polarización lineal e impedancia, los cuales tienen un valor real aproximado de la corrosión que sufre el componente más costoso de prototipo, como lo es el ánodo.

Aportes y Recomendaciones

A pesar de las limitaciones, este estudio proporciona una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en la producción de ácido hipocloroso mediante electrólisis salina. Los resultados obtenidos contribuyen a una mejor comprensión de la relación entre las variables del proceso y la eficiencia de producción, lo que puede guiar la optimización de diseños de

reactores y sistemas de producción, así como la mejora de este prototipo con fuentes de energía más limpias, como la solar que garanticen una producción verde en un 100%.

Se recomienda realizar estudios adicionales con métodos de medición más precisos para cuantificar la producción de ácido hipocloroso y establecer relaciones cuantitativas más sólidas. La exploración de diferentes configuraciones de reactores, materiales de electrodos y condiciones de operación, puede conducir a mejoras significativas en la eficiencia y escalabilidad del proceso.

Además, se sugiere investigar la aplicación del ácido hipocloroso producido en diferentes contextos, como la desinfección de agua, superficies y equipos médicos, para evaluar su eficacia y seguridad en comparación con los métodos tradicionales. Se recomienda analizar en futuras investigaciones Trazas de rutenio e iridio en el producto terminado para garantizar 100 su uso en aplicaciones más complejas tales como; agua de consumo y uso médico.

El hidrógeno generado en el cátodo junto con el hidróxido de sodio según ecuación 4 no fue objeto de estudio, ni tampoco se realizó alguna medición directa del mismo, pero el burbujeo observado en el cátodo junto con el aumento de pH son indicadores de su formación. Es importante resaltar que el hidrógeno a futuro se perfila como sustituto de gas natural y gas propano y por lo tanto se destaca como un subproducto de alto interés para investigaciones relacionadas o posibles integraciones al componente de fuente de energía eléctrica requerido para llevar a cabo las reacciones.

Se recomienda hacer investigaciones a futuro sobre la afectación de salud de metales como titanio, hierro, iridio y rutenio, puesto que la regulación local (Resolución No. 2115 del 22 de Junio de 2007) no entrega ninguna información explícita sobre este valor.

Conclusiones

Acorde con los objetivos específicos del proyecto, se logró seleccionar las variables y calcular sus rangos teóricos en el proceso de electrólisis salina, incluyendo el tiempo de residencia, la concentración de la sal en solución, el voltaje, el amperaje adecuado y el cloro teórico, teniendo en cuenta el estudio de antecedentes y conversión matemática de unidades. Lo anterior permitió el diseño de un prototipo técnico detallado del sistema de electrólisis salina, considerando los flujos, la selección de materiales y componentes adecuados para garantizar la eficiencia y seguridad del procedimiento. Se ensamblaron los componentes seleccionados, logrando su funcionalidad en dos regímenes y cumpliendo con los parámetros requeridos para el proceso. Finalmente, se analizó la concentración de cloro obtenida por medio de técnicas de laboratorio, que fueron validadas con curvas de calibración y manejo estadístico. Por medio de los análisis se estableció una relación entre estos parámetros y las variables operativas, como el amperaje, el voltaje y la concentración de sal y cloro libre, para validar el desempeño del mismo.

El presente estudio demostró la viabilidad de producir ácido hipocloroso mediante electrólisis salina utilizando un prototipo de reactor de diseño modular el cual logró funcionar con dos formas de flujo; continuo y estacionario. Los resultados experimentales confirmaron la influencia del voltaje, la concentración de sal y el tiempo de residencia en la producción de ácido hipocloroso, y revelaron una relación lineal entre el amperaje y la concentración de sal en condiciones estacionarias, respaldado por un coeficiente de determinación (R^2) de 0.996.

Se obtuvieron resultados prometedores de cloro libre en voltajes mayores a 5 y concentraciones de sal desde los 0.18%, para concentraciones de rango cloro libre logradas entre 5 y 120 ppm dependiendo de las condiciones del ensayo. Para el reactor funcionando de forma continua se logró una producción máxima experimental en el rango de 5-10 ppm. Estas

concentraciones pueden ser consideradas para limpieza de superficie y con mayores estudios de inocuidad, podrían llegar a ser utilizadas para saneamiento de agua potable.

Aunque se encontraron algunas limitaciones en la precisión de las mediciones y la escalabilidad del sistema, este estudio sienta las bases para futuras investigaciones y desarrollos en la producción y aplicación del ácido hipocloroso con una configuración de reactor económica y amigable con el medio ambiente, para la producción de un agente desinfectante seguro y efectivo. La posibilidad de producir este compuesto en sitio, utilizando materiales de fácil acceso y minimizando el impacto ambiental, representa una alternativa prometedora para diversas industrias y aplicaciones, contribuyendo así a los objetivos de desarrollo sostenible relacionados con la salud, el medio ambiente y la innovación tecnológica.

Finalmente, se resalta que este proyecto se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) número 3, 6, 9 y 12, relacionados con la salud y bienestar, agua limpia y saneamiento, industria, innovación e infraestructura, y producción y consumo responsable, respectivamente. Se espera que este trabajo contribuya a la generación de tecnologías más limpias y sostenibles para la producción de ácido hipocloroso, promoviendo la salud pública y la innovación tecnológica en Colombia.

Referencias

- Bard, A. J. & Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical methods: Fundamentals and applications* (2nd ed.). New York: Wiley.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2002). *Transport Phenomena* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Block, M. S. & Rowan, B. G. (2020). Hypochlorous Acid: A Review. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 78(9), 1461–1466. <https://doi.org/10.1016/j.joms.2020.06.029>
- Bockris, J. O'M. & Reddy, A. K. N. (1970). *Modern electrochemistry* (2nd ed.). New York: Plenum Press.
- Burstein, G. T. (2005). A hundred years of Tafel's Equation: 1905–2005. *Corrosion Science*, 47(12), 2858–2870. <https://doi:10.1016/j.corsci.2005.07.002>
- Chang, R. (2013). *Química* (11a. ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Coronado, S. M., Henao, D. C., Londoño, Á. L. & Herruzo, R. (2011). Efecto micobactericida del ácido hipocloroso en tres especies ambientales potencialmente patógenas y en *Mycobacterium tuberculosis*. *INFECTIO*, 15(4), 243–252. [https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1016/S0123-9392\(11\)70738-X](https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1016/S0123-9392(11)70738-X)
- Déplanche, Y. (1996). *Diccio fórmulas*. Área del rombo. Edunsa.
- Ehl, R. G. & Ihde, A. J. (1954). Faraday's electrochemical laws and the determination of equivalent weights. *Journal of Chemical Education*, 31(5), 226. <https://doi:10.1021/ed031p226>
- EW TECH. (n.d.). *EQUIPOS GENERADORES TECNOLOGÍA ECA*. <https://ewtech.la/aplicaciones/agroindustria/tecnologia-eca/>
- Fernández Romero, A. J., García Antón, J., Rodrigo, M. & Sirés, I. (2021). *Aplicaciones*

- medioambientales y energéticas de la tecnología electroquímica*. Editorial Reverte.
- Hughes-Hallett, D., McCullum, W. G., et al. (2005). *Applied Calculus* (4th ed.). Wiley.
- Kim, S. K., Shin, D.-M., & Rhim, J. W. (2021). Designing a high-efficiency hypochlorite ion generation system by combining cation exchange membrane aided electrolysis with chlorine gas recovery stream. *Journal of Membrane Science*, 630. <https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1016/j.memsci.2021.119318>
- Kim, S., (2017). Production of electrolyzed water for home-use based on electrodeposited macroporous platinum. *J Mech Sci Technol* 31, 1843–1849 (2017). <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0331-x>
- Lafaurie, G. I., Calderón, J. L., Zaror, C., Millán, L. V., & Castillo, D. M. (2015). Ácido Hipocloroso: una Nueva Alternativa como Agente Antimicrobiano y para la Proliferación Celular para Uso en Odontología. *International Journal of Odontostomatology*, 9(3), 475-481. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-381X2015000300019>
- Millikan, R. A. & Bishop, E. S. (1917). *Elements of Electricity*. American Technical Society.
- Morales Angulo, B. J. & Pacheco Alvear, J. A. (2021). *Evaluación de tres dosis de ácido hipocloroso en el agua de bebida y su incidencia en el rendimiento y producción de pollos de engorde*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/24120>
- Mourad, K. A., & Hobro, S. (2020). Developing chlorine-based antiseptic by electrolysis. *Science of the Total Environment*, 709. <https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1016/j.scitotenv.2019.13610>
- Murrieta, M. F., & Nava, J. L. (2021). Electrosynthesis of hypochlorous acid in a filter-press electrolyzer and its modeling in dilute chloride solutions. *Journal of Electroanalytical*

Chemistry, 892. <https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1016/j.jelechem.2021.115286>

O'Neil, G. D., Christian, C. D., Brown, D. E., & Esposito, D. V. (2016). *Hydrogen Production with a Simple and Scalable Membraneless Electrolyzer*. *Journal of The Electrochemical Society*, 16. [https://doi.org/10.1149/2.0021611jes3\(11\), F3012-F3019](https://doi.org/10.1149/2.0021611jes3(11), F3012-F3019).

Organización para las Naciones Unidas. (2015). *Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación*.

Infraestructura - Desarrollo Sostenible Naciones Unidas.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>

Solorzano, S. (24 de marzo de 2012). La pandemia hizo que el gasto en productos de aseo para el hogar aumentará 11% en 2020. *Revista digital La República*.

<https://www.larepublica.co/empresas/pandemia-hizo-que-gasto-en-productos-de-aseo-para-el-hogar-aumentara-11-en-2020-3143510>

Song, J., Wei, C., Huang, Z., Liu, C., Zeng, L., Wang, X. & Xu, Z. (2020). A Review on Fundamentals for Designing Oxygen Evolution Electrocatalysts. *Chemical Society Reviews*, 49(7), 2196–2214. <https://dx.doi.org/10.1039/C9CS00607A>

Stroman, D. W., Mintun, K., Epstein, A. B., Brimer, C. M., Patel, C. R., Branch, J. D., & Ministerio de la Protección Social, & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

(2007). *Resolución 2115 de²⁰⁰⁷: Por la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano*. Bogotá, Colombia.

<https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/2115%20-%202007.pdf>

Najafi-Tagol, K. (2017). Reduction in bacterial load using hypochlorous acid hygiene solution

on ocular skin. *Clinical Ophthalmology*, 11, 707–714.

<https://doi.org/10.2147/OPHTH.S132851>

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2020). *List N: Products with Emerging Viral Pathogens AND Human Coronavirus claims for use against SARS-CoV-2 Date Accessed*. https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-06/documents/sars-cov2_listn_06122020.pdf

Wang, L., Bassiri, M., Najafi, R., et al. (2007). Hypochlorous acid as a potential wound care agent: Part I. Stabilized hypochlorous acid: A component of the inorganic armamentarium of innate immunity. *J Burns Wounds*, 6, e5.

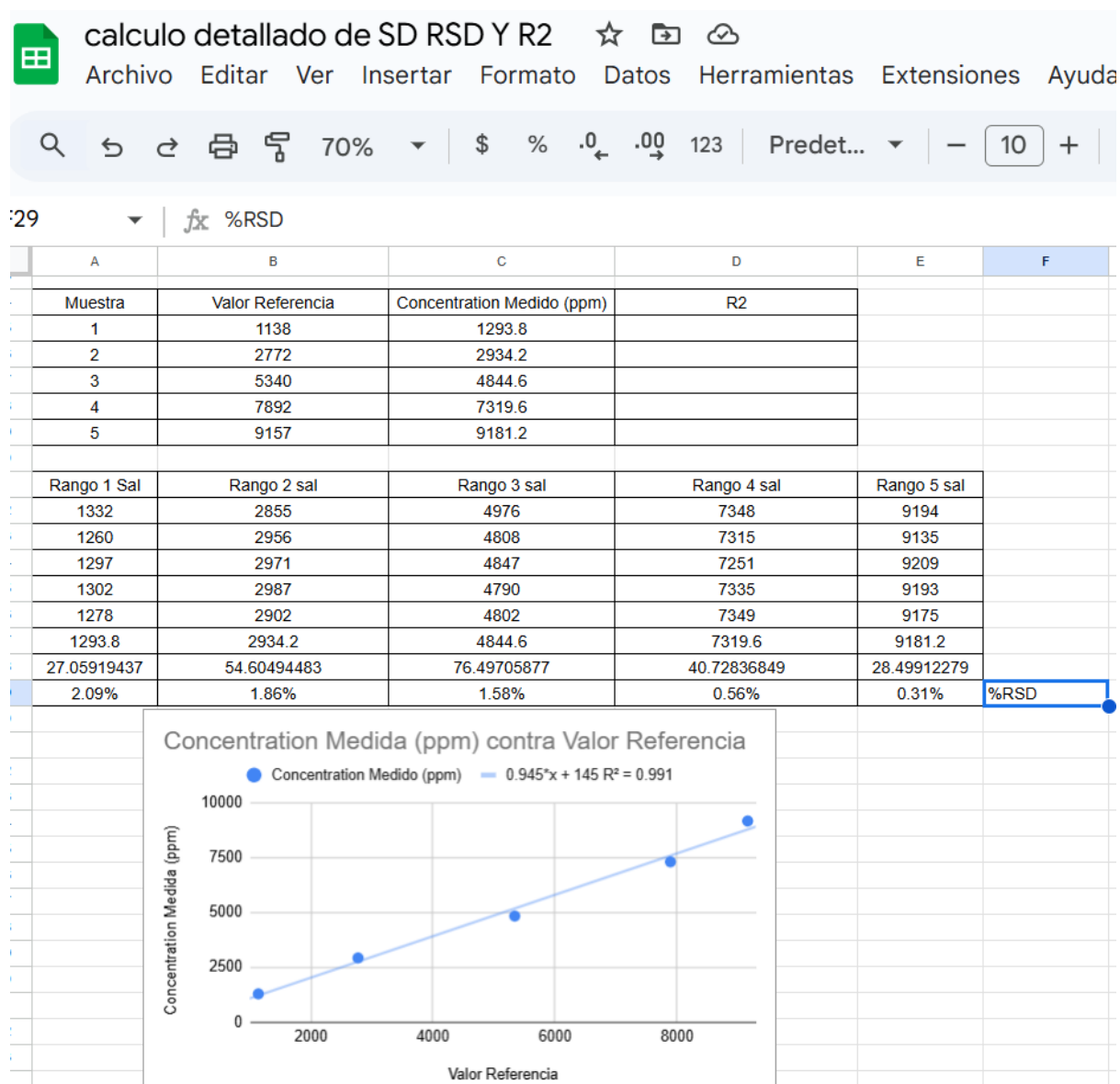
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1853323/>

Wellquem de Colombia SAS. (2024). *Tienda virtual Wellquem*. <https://wellquem.com/tienda-en-linea/>

Apéndice

Apéndice A.

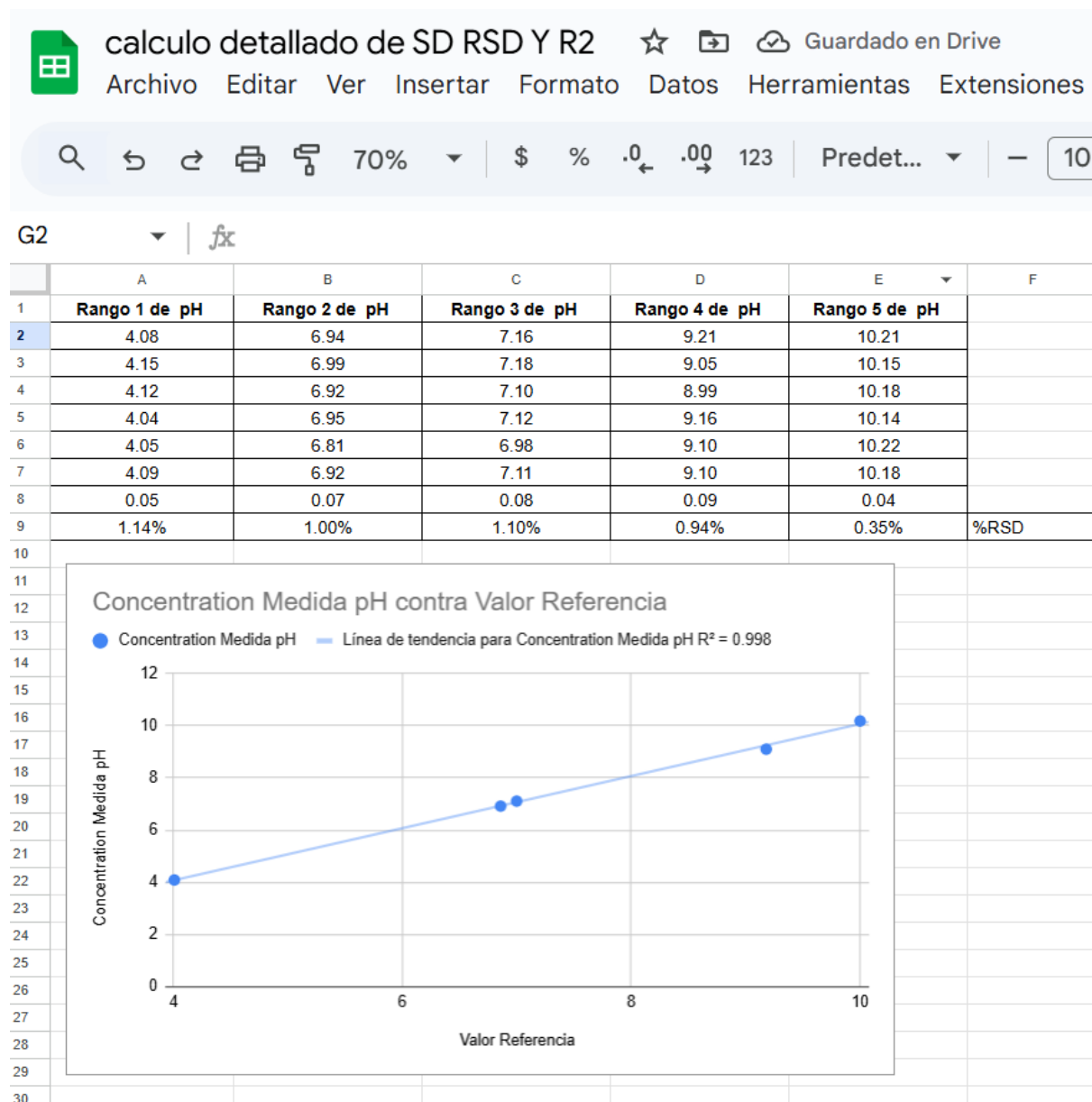
Estudios y Manejo Estadístico de Tabla de Datos con Google Spread Sheet Para Cálculo de SD (Variación Estándar) y R2 de Equipo Digital Medidor de ppm NaCl.



Nota: Rango para cálculo de %RSD, 5 repeticiones cada rango. Rango de la curva para 5 valores especificados de ppm NaCl. *Fuente:* Autoría Propia (2025).

Apéndice B.

Estudios y Manejo Estadístico de Tabla de Datos con Google Spread Sheet Para Cálculo de SD (Variación Estándar) y R2 de Equipo Digital Medidor de pH.



Nota: Rango para cálculo de %RSD de 5 rangos, 5 repeticiones cada uno. Rango de la curva para 5 valores según rangos especificados de ppm NaCl. *Fuente:* Autoría Propia (2025).

Apéndice C.

Estudios y Manejo Estadístico de Tabla de Datos con Google Spread Sheet Para Cálculo de %RSD (Porcentaje de Variación Estándar) de Temperatura Medidas en ° Celsius.

	A	B	C	D	E	F
1	Temperatura	Temperatura				
2	25.5	26.6				
3	25.2	26.2				
4	25.2	26.5				
5	25.3	26.6				
6	25.5	26.4				
7	25.3	26.5				
8	0.2	0.2				
9	0.60%	0.63%	%RSD			
10						
11						
12						
13						
14						

Nota. Rango para cálculo de %RSD promedio 9137.8ppm de 10 valores. Rango de la curva para 5 valores según rangos especificados de ppm NaCl. *Fuente:* Autoría Propia (2025).

Apéndice D.

Estudios y Manejo Estadístico de Tabla de Datos con Google Spread Sheet Para Cálculo de %RSD por Cada Estándar de Laboratorio (Porcentaje de Variación Estándar) de Concentración de Hierro en ppm.

calculo detallado de SD RSD Y R2 ☆ 📁 ☁

Archivo Editar Ver Insertar Formato Datos Herramientas Extensiones Ayuda

60% | \$ % .0 .00 123 | Predet... | 10 + | B I

E13

Muestra	Valor Referencia Fe	Concentration observada (ppm)	estandar
1	7.42	7.7044	1568
2	20080	20349	1646
3	33600	36460	2709
4	43200	41674	2710
5	51610	43840	2586

estandar 1568	
concentracon Hierro estandar	concentracon hierro Medido
7.42 +/- 0.44 ppm	7.7605
	7.5905
	7.8285
	7.599
	7.7435
Promedio	7.7044
Desviacion estandar	0.1050704526
%RSD	1.36%

estandar 1646	
concentracon Hierro estandar	concentracon hierro Medido
2.008% +/- 0.039	2.0145
	2.176
	2.0145
	1.9805
	1.989
Promedio	2.0349
Desviacion estandar	0.08032387565
%RSD	3.95%

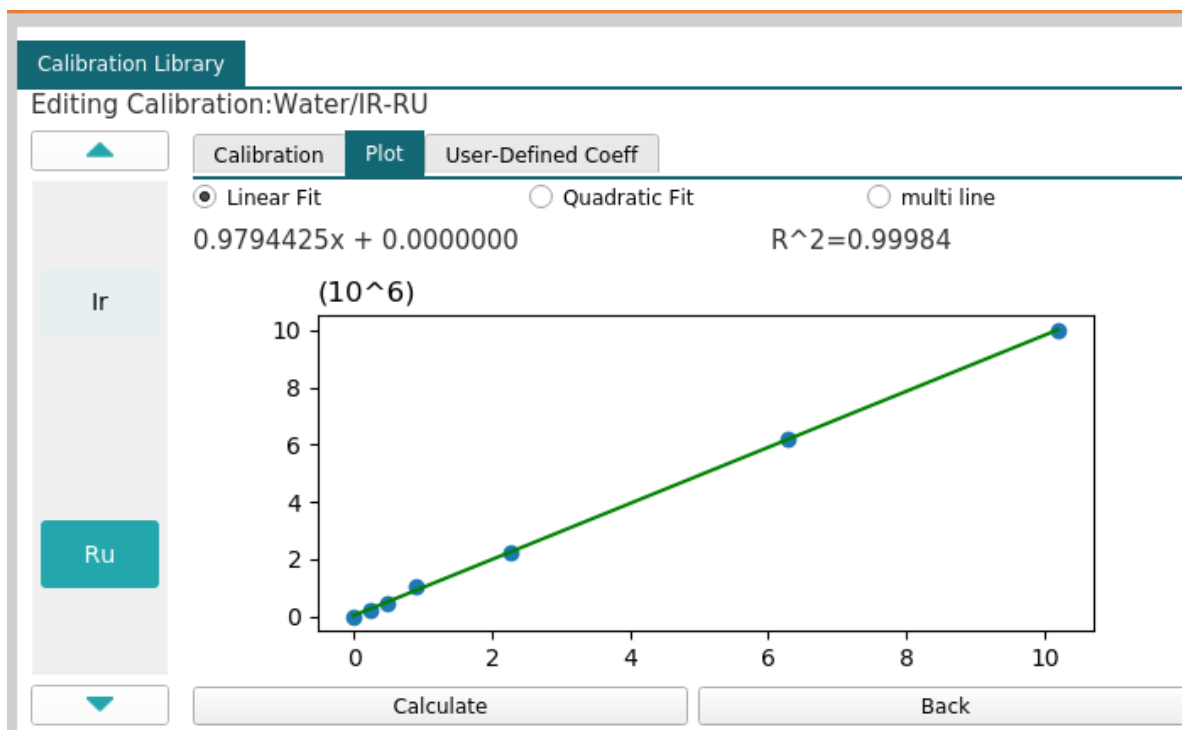
Estandar 2710	
concentracon Hierro estandar	concentracon hierro Medido
4.32 +/- 0.08	4.367
	4.139
	4.257
	4.124
	3.95
Promedio	4.1674
Desviacion estandar	0.1563819043
%RSD	3.75%

Estandar 2586	
concentracon Hierro estandar	concentracon hierro Medido
5.161	4.326086957
	4.358695652
	4.554347826
	4.402173913
	4.825
Promedio	4.49326087
Desviacion estandar	0.205020862
%RSD	4.56%

Nota. Rango para cálculo de % RSD para 5 rangos. Rango de la curva para 5 valores según rangos especificados de ppm NaCl. *Fuente:* Autoría Propia (2025).

Apéndice E.

Curva de Calibración y R2 de Rutenio, Calculado por Software de Equipo E-máx.



Nota. Curva de calibración preparada a partir de 7 soluciones, partiendo del estándar Agilent 7500 series PA tuning 2, con 10 ppm de Ru. *Fuente:* Autoría Propia (2025).

Apéndice F.

Estudios y Manejo Estadístico de Tabla de Datos con Google Spread Sheet Para Cálculo de % RSD (Porcentaje de Variación Estándar), Para Cada Solución Estándar Preparada de Concentración de Rutenio en ppm.

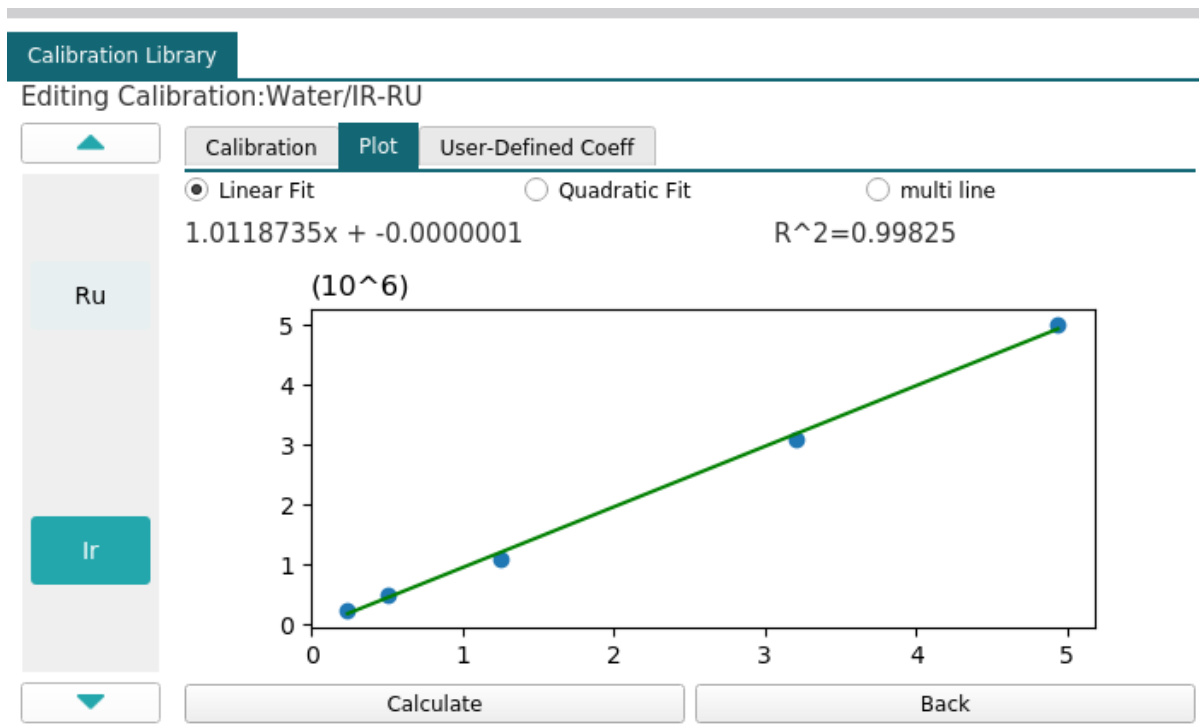
calculo detallado de SD RSD Y R2						
Archivo Editar Ver Insertar Formato Datos Herramientas Extensiones Ayuda						
50% \$ % .0 .00 123 Predet... - 10 + B						
G26 fx						
	A	B	C	D	E	F
1	MUESTRA	VALOR REFERENCIA	CONCENTRACION OBSERVADA		Muestra 1	
2	1	0	0		concentracion Rutenio estandar	concentracion Rutenio Medido
3	2	0.243	0.248		0	0
4	3	0.476	0.475			0
5	4	1.02	0.912			0
6	5	2.2	2.265			0
7	6	6.2	6.292			0
8	7	10	10.19			0
9						
10	Muestra 2		Muestra 3			
11	concentracion Rutenio estandar	concentracion Rutenio Medido	concentracion Rutenio estandar	concentracion Rutenio Medido		
12	0.243	0.248	0.476	0.463		
13		0.229		0.475		
14		0.25		0.46		
15		0.218		0.452		
16		0.245		0.472		
17	PROMEDIO	0.238	PROMEDIO	0.4644		
18	SD	0.01391042774	SD	0.009539392014		
19	%RSD	5.84%	%RSD	2.05%		
20	Muestra 4		Muestra 5			
21	concentracion Rutenio estandar	concentracion Rutenio Medido	concentracion Rutenio estandar	concentracion Rutenio Medido		
22	1.02	0.912	2.2	2.265		
23		0.952		2.251		
24		0.944		2.198		
25		0.948		2.224		
26		0.94		2.258		
27	PROMEDIO	0.936	PROMEDIO	2.238		
28	SD	0.0158492902	SD	0.02777948884		
29	%RSD	1.69%	%RSD	1.24%		
30	Muestra 6		Muestra 7			
31	concentracion Rutenio estandar	concentracion Rutenio Medido	concentracion Rutenio estandar	concentracion Rutenio Medido		
32	6.2	6.292	10	10.25		
33		6.234		10.19		
34		6.401		9.98		
35		6.298		10.2		
36		6.309		10.23		
37	PROMEDIO	6.3068	PROMEDIO	10.17		
38	SD	0.04101219331	SD	0.04242640687		
39	%RSD	0.65%	%RSD	0.42%		
40						

Nota. %RSD calculado por 5 repeticiones de cada rango. En total 6 rangos expresados en ppm

Rutenio. Fuente: Autoría Propia (2025).

Apéndice G.

Curva de Calibración y R2 de Iridio, Calculado por Software de Equipo E-máx.



Nota. Curva de calibración preparada a partir de 5 soluciones, partiendo del estándar Agilent 7500 series PA tuning 2, con 5 ppm de Ru. *Fuente:* Autoría Propia (2025).

Apéndice H.

Estudios y Manejo Estadístico de Tabla de Datos con Google Spread Sheet Para Cálculo de % RSD (Porcentaje de Variación Estándar) Para Cada Solución Estándar Preparada de Concentración de Iridio en ppm.

MUESTRA	VALOR REFERENCIA	CONCENTRACION OBSERVADA	Muestra 1	
			concentracon Iridio estandar	concentracon Iridio Medido
1	0	0	0	0
2	0.238	0.242		0
3	0.5	0.505		0
4	1.1	1.258		0
5	3.1	3.206		0
6	5	4.939		0
Muestra 2		Muestra 3		
concentracon Iridio estandar	concentracon Iridio Medido	concentracon Iridio estandar	concentracon Iridio Medido	
0	0.238	0.5	0.373	
			0.616	
			0.54	
			0.505	
			0.58	
		PROMEDIO	0.5228	
		SD	0.1015233983	
		%RSD	19.42%	
Muestra 4		Muestra 5		
concentracon Iridio estandar	concentracon Iridio Medido	concentracon Iridio estandar	concentracon Iridio Medido	
1.1	1.279	3.1	3.206	
	1.306		3.225	
	1.258		3.483	
	1.19		3.248	
	1.389		3.294	
PROMEDIO	1.281	PROMEDIO	3.304666667	
SD	0.07253481922	SD	0.1121414286	
%RSD	5.66%	%RSD	3.39%	
Muestra 6				
concentracon Iridio estandar	concentracon Iridio Medido			
3.1	4.939			
	5.066			
	4.982			
	5.02			
	4.894			
PROMEDIO	4.9802			
SD	0.08980256121			
%RSD	1.80%			

Nota. % RSD calculado por 5 repeticiones de cada rango. En total 5 rangos expresados en ppm Iridio. Fuente: Autoría Propia (2025).