



**Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión**

**Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia  
Escuela Profesional Ingeniería Química**

**Construcción de una celda de electrocoagulación con electrodos de aluminio  
reciclados para tratamiento de aguas turbias**

**Tesis**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico

**Autor**

Leonardo Enrique Uría Paredes

**Asesor**

Ing. Víctor Raúl Coca Ramírez

**Huacho – Perú**

2023

# "CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN CON ELECTRODOS DE ALUMINIO RECICLADOS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS TURBIAS"

## INFORME DE ORIGINALIDAD

19%

INDICE DE SIMILITUD

19%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://repositorio.unjfsc.edu.pe">repositorio.unjfsc.edu.pe</a> Fuente de Internet	2%
2	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	1%
3	<a href="http://repositorio.unh.edu.pe">repositorio.unh.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
4	<a href="http://repositorio.ug.edu.ec">repositorio.ug.edu.ec</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="http://1library.co">1library.co</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="http://repositorio.usmp.edu.pe">repositorio.usmp.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="http://renati.sunedu.gob.pe">renati.sunedu.gob.pe</a> Fuente de Internet	1%
8	Submitted to Universidad Nacional Jose Faustino Sanchez Carrion Trabajo del estudiante	<1%



# Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión

## FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA y METALÚRGICA COMISIÓN DE GRADOS Y TÍTULOS

### ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

En Huacho, el viernes 26 de mayo del 2023, siendo las 11:00 horas en los ambientes de la Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica, los miembros del Jurado Evaluador integrado por:

<b>Presidente:</b>	Dr. MÁXIMO TOMÁS SALCEDO MEZA	DNI Nº 15602588
<b>Secretario :</b>	Dr. ALBERTO IRHAAM SÁNCHEZ GUZMÁN	DNI Nº 15758117
<b>Vocal :</b>	M(o). JAIME IMAN MENDOZA	DNI Nº 40936175
<b>Asesor :</b>	Dr. VÍCTOR RAÚL COCA RAMÍREZ	DNI Nº 15601160

El postulante al Título Profesional de **Ingeniero Químico: URÍA PAREDES, LEONARDO ENRIQUE**, identificado (a) con D.N.I Nº **75384681** procedió a la Sustentación de la tesis: **“CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN CON ELECTRODOS DE ALUMINIO REICLADOS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS TURBIAS”**; autorizado mediante **Resolución de Decanato N.º0227-2023-FIQyM** de fecha 24 de mayo del 2023, de conformidad con las disposiciones del Reglamento General para el Otorgamiento de Grados y Títulos Profesionales vigente, el tesista **U** absolvió las interrogantes que le formularon los señores Miembros del Jurado. Concluida la Sustentación de la Tesis, se procedió a la votación correspondiente resultando el candidato **Aprobado** por **UNANIMIDAD** con la nota:

CALIFICACIÓN		EQUIVALENCIA	CONDICIÓN
NUMERO	LETRAS		
18	dieciocho	Excelente	Aprobado

Siendo las **12:05** horas del viernes 26 de mayo del 2023, se dio por concluido el Acto de Sustentación **PRESENCIAL** de tesis firmando el Jurado Evaluador las Actas de Sustentación de la Tesis para optar el Título Profesional de **INGENIERO QUÍMICO**, inscrito en el **folio 034** del **LIBRO DE ACTA 2023-1**



Dr. MÁXIMO TOMÁS SALCEDO MEZA  
PRESIDENTE



Dr. ALBERTO IRHAAM SÁNCHEZ GUZMÁN  
SECRETARIO



M(o). JAIME IMAN MENDOZA  
VOCAL



Dr. VÍCTOR RAÚL COCA RAMÍREZ  
ASESOR

## **DEDICATORIA**

**Dedico mi tesis principalmente a Dios, por darme la fuerza necesaria para culminar esta meta.**

**A mis padres, por todo su amor y por motivarme a seguir hacia adelante.**

**También a mi enamorada, por brindarme su apoyo moral en esas noches que tocaba investigar.**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por darme la vida, por acompañarme a lo largo de mi carrera, por ser mi luz en mi camino gracias a él aprendí lo bueno y lo malo algunas fueron bendiciones y otras lecciones de vida, de igual manera me brindó de sabiduría en momentos de concentración en la investigación, gracias por darme fortalezas en alcanzar mis metas.

A mis padres, por todo su esfuerzo, apoyo, amor y cariño en este proyecto y a lo largo de mi vida, por sus palabras de aliento, por sus consejos y sabias palabras. A mi enamorada por motivarme a seguir investigando debido a que debatíamos sobre el tema porque también es mi colega. Al Ing. VÍCTOR RAÚL COCA RAMÍREZ por su apoyo, por compartir sus conocimientos y experiencias, aquellos que permitieron realizar el presente trabajo de investigación, de la misma manera por explicarme pausadamente los detalles del tema.

<b>RESUMEN</b> .....	10
<b>INTRODUCCION</b> .....	12
<b>CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	13
<b>1.1 Descripción de la realidad problemática</b> .....	13
<b>1.2 Formulación del problema</b> .....	14
<i>1.2.1 Problema general</i> .....	14
<i>1.2.2 Problemas Específicos</i> .....	14
<b>1.3 Objetivos de la investigación</b> .....	14
<i>1.3.1 Objetivo general</i> .....	14
<i>1.3.2 Objetivos Específicos</i> .....	14
<b>1.4 Justificación de la investigación</b> .....	15
<b>1.5 Delimitación de estudio</b> .....	16
<b>1.6 Viabilidad de estudio</b> .....	17
<b>CAPITULO II. MARCO TEÓRICO</b> .....	18
<b>2.1 Antecedentes de la investigación</b> .....	18
<i>2.1.1 Antecedentes Internacionales</i> .....	18
<i>2.1.2 Antecedentes Nacionales</i> .....	20
<b>2.2 Bases teóricas</b> .....	22
<i>2.2.1 Principios de la electroquímica</i> .....	22
<b>2.2.1.1 Primera ley de Faraday</b> .....	22
<b>2.2.1.2 Segunda ley de Faraday</b> .....	23
<i>2.2.2 Celdas electroquímicas</i> .....	23
<b>2.2.2.1 Tipos de celdas</b> .....	23
<b>2.2.2.2 Electroodos</b> .....	26
<i>2.2.3 Electrocoagulación</i> .....	27
<b>2.2.3.1 Principios de reacción</b> .....	28
<b>2.2.3.2 Electroodos de aluminio</b> .....	29
<i>2.2.3 Los envases de lata</i> .....	31

2.2.3.1 Recuperación de latas de bebidas .....	32
2.2.3.2 Presentación de las latas .....	33
2.2.4 <i>Tratamiento de aguas</i> .....	34
2.3 Definición de términos básicos .....	36
2.4 Formulación de hipótesis .....	37
2.4.1 <i>Hipótesis general</i> .....	37
2.4.2 <i>Hipótesis específica</i> .....	38
2.5 Operacionalización de variables .....	38
<b>CAPITULO III: METODOLOGÍA</b> .....	40
3.1 Diseño metodológico.....	40
3.1.1 <i>Diseño y fabricación de la celda de electrocoagulación</i> .....	40
3.2. Población y muestra.....	42
3.3 Técnicas de recolección de datos.....	43
3.3.1 <i>Técnicas a emplear</i> .....	43
3.3.2 <i>Descripción de los instrumentos</i> .....	43
3.4. Técnicas para el procesamiento de la información .....	43
3.4.3 <i>Procedimiento experimental</i> .....	44
<b>CAPITULO IV: RESULTADOS</b> .....	46
4.1. Dimensionamiento de la celda.....	46
4.2 Electrodos.....	47
4.3 Sistema de electrocoagulación.....	48
4.4 Caracterización físico química del agua de muestra.....	50
<b>CAPITULO V: DISCUSIONES</b> .....	51
<b>CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	60
5.1 Conclusiones .....	60
5.2 Recomendaciones .....	60
<b>CAPITULO VII: FUENTES DE INFORMACIÓN</b> .....	61
<b>ANEXOS</b> .....	64

<b>ANEXO 1. Montaje de un sistema de electrocoagulación .....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS 2. Fotografías .....</b>	<b>66</b>
<b>ANEXO 3: Instrumentos de análisis .....</b>	<b>68</b>

**INDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Descripción de propiedades de los elementos.....	22
Tabla 2: Reacciones anódicas del electrodo de aluminio y hierro. ....	28
Tabla 3: Reacciones presentes en el proceso de electrocoagulación con el uso del aluminio.....	30
Tabla 4: Aluminio para bebidas de 12 OZ. ....	33
Tabla 5: Medición de los parámetros establecidos en el estudio - 1era. ....	50
Tabla 6: Medición de los parámetros establecidos en el estudio - 2da. ....	50
Tabla 7: Dimensionamiento de celdas de electrocoagulación, en el trabajo realizado. ....	51
Tabla 8: Dimensionamiento de celdas de electrocoagulación, según Arango y Garcés. ....	51
Tabla 9: Dimensionamiento de electrodos, en el trabajo realizado.....	52
Tabla 10: Dimensionamiento de electrodos, según Arango y Garcés.....	53
Tabla 11: Espesor de electrodos, de la celda de electrocoagulación.....	54
Tabla 12: Variables de funcionamiento del sistema.....	55
Tabla 13: Variables de fruncimiento del sistema, según Arango y Garcés.....	55
Tabla 14: Caracterización del residual líquido.....	59
Tabla 15: Características del agua luego del proceso de electrocoagulación.....	59

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Delimitación del área de estudio.....	16
Figura 2: Configuración monopolar, arreglo en forma paralela de electrodos.....	25
Figura 3: Configuración bipolar.....	25
Figura 4: Esquema genérico de una celda de electrocoagulación.....	29
Figura 5: Vista de la formación de los electrodos.....	32
Figura 6: Presentación de lata de aluminio de 12 oz.....	33
Figura 7: Montaje experimental de la nueva celda Electrocoagulación.....	35
Figura 8: Zonas en la celda de electrocoagulación.....	41
Figura 9: Suministrador de energía.....	42
Figura 10: Pruebas de funcionamiento del sistema.....	44
Figura 11: Pruebas de agua de canal de regadío.....	45
Figura 12: Dimensiones de la celda.....	46
Figura 13: Vista frontal de la celda.....	47
Figura 14: Electrodo rectangular de aluminio reciclado.....	47
Figura 15: Celda de electrocoagulación con electrodos de aluminio.....	48
Figura 16: Vista del sistema para el proceso de electrocoagulación.....	48
Figura 17: Celda electrolítica en funcionamiento.....	49
Figura 18: Formación de burbujas de H <sub>2</sub> con agua de canal de regadío.....	49
Figura 19: Medidas del dimensionamiento de las celdas.....	52
Figura 20: Dimensionamiento de electrodos.....	53
Figura 21: Espesor de los electrodos.....	54
Figura 22: Espaciamiento de electrodos.....	55
Figura 23: Numero de electrodos.....	56
Figura 24: Intensidad de corriente eléctrica.....	57
Figura 25: Voltaje suministrada al sistema de electrocoagulación.....	57
Figura 26: Voltaje suministrada al sistema de electrocoagulación.....	58

## RESUMEN

La presente indagación titulada “Construcción de una celda de electrocoagulación usando aluminio reciclado como electrodos de aluminio para tratamiento de aguas turbias”, busca la construcción de un prototipo para la electrocoagulación de aguas a través de electrodos de aluminio provenientes de latas recicladas. El tamaño de la celda está relacionado con un sistema por lotes a nivel de laboratorio, la cual operara con una capacidad de 3.5lt de muestra de agua residual. El material con lo que se ensablo la celda fue de un vidrio grueso transparente (1cm), donde se sumergen los electrodos de aluminio (reciclado) de forma cuadrangular (10 cm x 10 cm). La electrocoagulación se presenta como una nueva alternativa para este proceso, donde se usa una celda electrolítica por la cual fluye una determinada corriente eléctrica. Los electrodos que se usan en este proceso son principalmente fabricados de hierro y aluminio, esta última se encuentra presente en la composición de las latas de bebidas que a diario son desechados, causando una contaminación ambiental. El estudio realizado concluye con el análisis de los parámetros registrado en el informe y se estableció que los de mayor importancia en el proceso son: tiempo de retención, la intensidad de corriente, espacio entre electrodos y pH.

Palabras claves:

Electrocoagulación, electrodos de aluminio, intensidad de corriente, tiempo de residencia.

## ABSTRACT

The present investigation entitled "Construction of an electrocoagulation cell using recycled aluminum as aluminum electrodes for treatment of turbid water", seeks the construction of a prototype for the electrocoagulation of water through aluminum electrodes from recycled cans. The size of the cell is related to a batch system at the laboratory level, which will operate with a capacity of 3.5lt of wastewater sample. The material with which the cell was assembled was a thick transparent glass (1cm), where the (recycled) aluminum electrodes are immersed in a quadrangular shape (10 cm x 10 cm). Electrocoagulation is presented as a new alternative for this process, where an electrolytic cell is used through which a certain electric current flow. The electrodes used in this process are mainly made of iron and aluminum, the latter is present in the composition of beverage cans that are discarded daily, causing environmental pollution. The study carried out concludes with the analysis of the parameters recorded in the report and it was established that the most important in the process are: retention time, current intensity, space between electrodes and pH.

Keywords:

Electrocoagulation, aluminum electrodes, current intensity, residence time.

## INTRODUCCION

Para el tratamiento de aguas turbias, los procesos más utilizados son la coagulación y floculación, los cuales emplean sustancias químicas, estos procesos son conocidos como coagulación química. La electrocoagulación cumple la misma función que la coagulación química y la ventaja que posee respecto a este método es que la electrocoagulación es más eficiente y requiere de menores costos de operación.

A través de los últimos años el empleo de los envases de aluminio ha ido incrementándose, debido a las excelentes características que posee este metal para la conservación de los alimentos y bebidas, muy en especial en el de las bebidas. De acuerdo a la asociación de latas de bebidas, nos dice que en España creció en un 4,6% en volumen los residuos de latas. Estos envases de aluminio son muy útiles para ser reciclados. Los envases en su gran mayoría son de bebidas de cerveza.

En América latina, también ha ido creciendo el consumo de cervezas con envases que son de latas. Por otro lado, en Brasil se lanzó el agua enlatada. Si bien es cierto que estos envases hacen que los océanos no se llenen de contaminantes sólidos. Lo que provocan un mal manejo de las mismas hacen que sean dañinas para el medio ambiente.

## **CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 Descripción de la realidad problemática**

Para la remoción de la turbidez que presenta un cuerpo o muestra de agua, se usan agentes químicos como por ejemplo el aluminato de sodio, sulfato de aluminio o sulfato férrico. La electrocoagulación se presenta como una nueva alternativa para este proceso, donde se usa una celda electrolítica por la cual fluye una determinada corriente eléctrica. Los electrodos que se usan en este proceso son principalmente fabricados de hierro y aluminio, esta última se encuentra presente en la composición de las latas de bebidas que a diario son desechados, causando una contaminación ambiental.

En el mundo actual, las aguas residuales son recursos infravalorados, que por lo general son vistos como una molestia que deben ser eliminados o simplemente deben ser ignorados. Esta perspectiva errónea debe cambiar, debido a que las aguas residuales son fuentes accesibles y sostenibles de agua, nutrientes, energía y materia orgánica (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2017).

Por otro lado, la contaminación por el desecho de latas de aluminio ha incrementado con los últimos años, en todo el mundo. Como se sabe el material con mayor presencia en la corteza terrestre es el aluminio, pero el procesamiento para obtenerlo como tal es muy costoso. En muchos casos las latas de aluminio implican la reducción de residuos de plástico en el océano, pero sus altos costos ecológicos nos hacen pensar que no es una alternativa viable.

El Perú en el año 2016 se registró un total de 7'005,576 ton. de residuos sólidos generados, de las cuales solo el 18.7% son residuos inorgánicos que son reciclados. En el 2017 el MINAM publicó el Reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos

Sólidos, la cual incita reducir la generación de residuos sólidos, y a su vez promueve la recuperación y valoración de estas.

## **1.2 Formulación del problema**

### ***1.2.1 Problema general***

¿Cómo construir una celda de electrocoagulación con electrodos de aluminio provenientes de latas recicladas?

### ***1.2.2 Problemas Específicos***

- ¿Cuáles son las variables que se deben de tomar en consideración en la construcción de una celda de electrocoagulación que utilice electrodos de aluminio reciclado?
- ¿Cuáles son las dimensiones que debe tener la celda de electrocoagulación con electrodos de aluminio reciclado?
- ¿Cuál es el dimensionamiento de los electrodos de aluminio que se utilizarán en la celda de electrocoagulación?

## **1.3 Objetivos de la investigación**

### ***1.3.1 Objetivo general***

Construir una celda de electrocoagulación con electrodos de aluminio provenientes de latas recicladas.

### ***1.3.2 Objetivos Específicos***

- Identificar las variables que se deben de tomar en consideración en la construcción de una celda de electrocoagulación con electrodos de aluminio reciclado.
- Determinar las dimensiones que debe tener la celda de electrocoagulación con electrodos de aluminio reciclado.
- Determinar el dimensionamiento de los electrodos de aluminio que se utilizarán en la celda de electrocoagulación

#### **1.4 Justificación de la investigación**

La reutilización de latas de aluminio como electrodos en un sistema de electrocoagulación, representa una alternativa que busca suplir el proceso de coagulación química. Las aguas residuales urbanas e industriales presentan una turbidez ocasionada por la presencia de materia en forma de coloides, a causa de su tamaño, estos contaminantes no pueden ser removidos por la aplicación de operaciones unitarias (flotación y decantación).

El aluminio es el elemento con mayor presencia en la tierra, pero los costos para la separación de otros elementos con la que se encuentra en su estado natural son muy elevados. El aluminio es usado para la fabricación de latas para envasar bebidas, por ello en la actualidad estas latas son una fuente potencial de contaminantes al medio ambiente. Por otro lado, el crecimiento de la demografía, ha traído consigo el aumento de caudales de aguas residuales.

El fundamento de la electroquímica es el principio en la que se basa el trabajo de investigación, gracias a la metodología aplicada, futuras investigaciones tomaran como referencia el presente trabajo de investigación, donde se realizara un análisis de diferentes perspectivas sociales y científicas.

El estudio del proceso de electrocoagulación, hace que el investigador comprenda fenómenos químicos de oxido-reducción. Por otro lado, ayuda a visualizar, cuáles son los contaminantes se encuentra con mayor frecuencia en las aguas residuales urbanas e industriales. La turbidez es un parámetro catalogado como estético, de esto depende la aceptación de las aguas por el consumidor.

## 1.5 Delimitación de estudio

- Tema: Construcción de una celda de electrocoagulación mediante el uso de electrodos de aluminio.
- Problemática: Remoción de turbidez mediante el uso de electrodos de aluminio de latas recicladas.
- Población de estudio: Latas de bebidas gaseosas, de cervezas.
- Lugar (ciudad) de estudio: UNJFSC- Huacho
- Año de estudio: 2022



Figura 1: Delimitación del área de estudio.

Fuente: Google -Earth

## **1.6 Viabilidad de estudio**

La investigación que se desarrolla, es factible debido que se dispone con las condiciones necesarias para realizar el proceso experimental.

El investigador cuenta con la capacidad suficiente para el desarrollo del marco teórico y experimental, por otro lado, el asesor brinda apoyo para el cumplimiento de los objetivos trazados.

La información necesaria se encuentra disponible y accesible, las cuales son recolectadas de fuentes seguras y con reconocimiento científico.

## CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes de la investigación

#### 2.1.1 Antecedentes Internacionales

Chaves (2021) en su trabajo de investigación, nos habla sobre el proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria cosmética. La investigación tiene como finalidad estudiar el proceso respecto a las directrices de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales generados en la industria de elaboración de productos cosméticos. Los parámetros a analizar son la DQO que para la valoración se usa el método reflujó abierto y titulación basada en la referencia SM 5220 B, la DBO5 su valoración es mediante la incubación 5 días y electrodo de membranas basada en la referencia SM 5210 B y 4500-O G, la turbidez la medición se realiza en unidades nefelométrías de turbidez basadas en la referencia SM 2130 B, grasas y aceites su valoración se realiza mediante extracción Soxhlet basada en la referencia SM 5520 D y los sólidos suspendidos totales que se miden por el método gravimétrico con un secado a 105°C basada en la referencia SM 2540 D. La caracterización de las aguas residuales de la fábrica de cosméticos arroja que la presencia de cloruros está en un rango de  $90.1 \pm 25$  mg/l, la DBO está en  $1885 + 653$  mg/l, DQO está en  $2358 \pm 333$  mg/l, los Fenoles está en  $0.23 \pm 0.1$  mg/l, el pH está en 6.00 – 9.28, los sólidos sedimentables están en  $1 \pm 0.5$  ml/l, los sólidos suspendidos totales está en  $247 \pm 50$  mg/l y la turbiedad está en 669 NTU. La calidad de las aguas se encuentra dentro de los Límites establecidos en la Resolución 631 del 2015. El sistema de electrocoagulación es eficiente en la eliminación de la turbiedad, las muestras de agua analizadas presentan una reducción de 77 a 98% de turbidez, al utilizar electrodos de aluminio como ánodo. Por otro lado, los electrodos de hierro presentan una remoción de turbidez de entre 54 a 93%. Comparando estos

resultados, al utilizar los electrodos de aluminio los datos de remoción turbidez son más favorables, este proceso presenta un pH = 8 con un tiempo de tratamiento de 30 minutos.

Magaña et al, (2020) su artículo trata sobre la eliminación de contaminantes de las aguas residuales lácteas aplicando el sistema de electrocoagulación con electrodos de Al. La investigación presenta como objetivo principal evaluar los resultados de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales generados en el proceso de fabricación de helados de Mayarí, para el cumplimiento del objetivo planteado se optó por el uso de una celda electroquímica con una capacidad útil para albergar 500 ml de agua residual, la forma cilíndrica construido de vidrio que cuenta con un diámetro de 96mm. La celda está conformada por dos electrodos de aluminio de forma paralela, con una separación de 10 mm y sumergidos a 57 mm en la muestra de agua residual. Para el abastecimiento de energía se usó la corriente directa. Los parámetros analizados fueron el pH, el tiempo de electrolisis y la densidad de corriente eléctrica. Una vez concluida el proceso de electrocoagulación, la muestra se deja en un proceso de sedimentación por un lapso de 120 min. En los resultados se halla que el agua residual que paso por el proceso de electrocoagulación segura en centrifugación siendo el ultimo un proceso el filtrado, presenta una DQO con un valor de 30 mg/l, la conductividad se encuentra con 7.8 mS/cm, la turbiedad está por debajo de 10 UNT y la perdida de color está en un 97%, la cual nos dice que el análisis de estos valores en función a los límites permisibles de pH > 9 y DQO < 700 mg O<sub>2</sub>/lt se localizan fuera del rango que proporciona la Norma Cubana NC 27:2012. Analizando de los resultados se arriba a la conclusión siguiente, desde el punto de vista económico, la densidad para una corriente eléctrica en el proceso de electrocoagulación esta  $i=3.39 \text{ mA/cm}^2$ , con un tiempo de electrolisis de 5 minutos y un pH = 9.5, la cual representó  $2.25 \cdot 10^{-5} \text{ kW-h}$  con un costo de 0.294 \$/t.

### ***2.1.2 Antecedentes Nacionales***

Aguilar & Palian (2020) en su trabajo de investigación nos habla de la remoción del fosfato de una muestra sintética relacionado con la densidad de corriente y el tiempo de residencia, mediante el proceso de electrocoagulación de electrodos de aluminio. El trabajo de investigación busca determinar la relación directa que hay entre la densidad de corriente y el tiempo de residencia en el proceso de eliminación de fosfatos mediante el uso de una celda de electrocoagulación, usando principalmente electrodos de aluminio. Para el cumplimiento del objetivo se optó por el desarrollo experimental, donde se dimensiono la celda de electrocoagulación que consto de: una celda electrolítica con un volumen de  $782.6 \text{ m}^3$  (dimensiones 8.6 cm de altura, 7 cm de hondura y 13 cm de longitud), los electrodos de aluminio (cátodo y ánodo) que fueron un total de 10 (electrodos), las cuales estuvieron separados 1 cm unos a otros. El modelado de la investigación estuvo basado en diez pruebas denotadas por " $P_{i=0;1; 2\dots;9}$ " donde  $P_0$  es la prueba inicial. La solución sintética se prepara con fosfatos se usos el Fosfato mono acido de dipotasio ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ), con la cual se preparó 1 litro de sustancia sintética con una composición de 306 ppm de  $\text{PO}_4$ . La densidad de corriente que se uso fue de  $1.32 \text{ mA/cm}^2$ ,  $3.97 \text{ mA/cm}^2$  y  $6.61 \text{ mA/cm}^2$ ; el tiempo de residencia fueron de 10 minutos, 35 minutos y de 60 minutos. La cantidad de solución sintética que se usó para el análisis y recolección de datos es de 300 ml. Los resultados determinaron que la mejor condición de trabajo es de densidad de corriente debe ser  $1.32 \text{ mA/cm}^2$  y como tiempo de residencia de 10 minutos. Con la cual se logró una remoción cerca a los 68.65% de fosfato total presenta en la muestra. Por consiguiente, la densidad de corriente y el tiempo de residencia no influye significativamente en la eliminación de fosfato, mediante el proceso de electrocoagulación que uso electrodos de aluminio.

Ruiz (2021) su trabajo nos habla sobre el aprovechamiento de envases de aluminio para la eliminación de DQO mediante el uso de un sistema de electrocoagulación que tiene como sede la ciudad de Huancavelica. Teniendo como finalidad de evaluar la eficiencia de una celda de electrocoagulación que usa como electrodos de aluminio de latas recicladas, para el tratamiento de aguas residuales (AR) basada en el parámetro de análisis de la DBO. La metodología que uso el autor, fue de carácter experimental basada en un diseño factorial debido a que el desarrollo del trabajo se ve afectado por factores (voltaje y tiempo) en base a 3 niveles de respuesta (DQO); para el cumplimiento del objetivo se usos tres pruebas donde el voltaje fue 15V; 20V y 25V y el tiempo fue de 10min; 15min y 20 min, estas condiciones fueron permutadas (15V vs 10 min; 20V vs 10 min; 25V vs 10 min; 15V vs 15 min; 20V vs 15 min; 25V vs 15 min; 15V vs 20 min; 20V vs 20 min; 25V vs 20 min). Estas permutaciones nos dan un total de 9 tratamiento, que servirán para el análisis de la eficiencia de la celda electrocoagulación. Los resultados que se analizan es que la remoción de la DQO es de un 60% en todas las permutaciones realizadas, donde el máximo nivel de remoción se presenta en las condiciones de 25V a un tiempo de electrocoagulación de 20 min, con un resultado de 73.6% de remoción. El análisis de los resultados nos proporciona e indica que el tiempo es un factor muy importante que el factor de voltaje y la interacción de ambos factores. Por otra parte, se puede observar que la celda de electrocoagulación que tiene como cátodos y ánodos latas de aluminio reciclado, tiene potencial para la dilaceración de aceites y grasas, debido a que en el proceso se produce la generación de burbujas de hidrogeno en el cátodo. Las AR industriales, tratadas mediante este proceso presentan una disminución en la DQO, esto se debe a la formación de hidróxido de aluminio (agente coagulante) lo que consiente disminuir la turbiedad del agua.

## 2.2 Bases teóricas

### 2.2.1 Principios de la electroquímica

#### 2.2.1.1 Primera ley de Faraday

El corolario menciona que: “La materia depositada en el cátodo, durante el proceso de la electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad suministrada a este electrodo” (Lagos et al, 2016).

Al conectarse una cierta cantidad de celdas en serie, donde las celdas contengan sales de diferentes metales como el  $\text{AgNO}_3$  (nitrato de plata) y  $\text{CuSO}_4$  (sulfato de cobre) se puede demostrar que las cantidades depositadas, en los electrodos, son químicamente equivalentes. Donde se demuestra que:

Tabla 1: Descripción de propiedades de los elementos.

Elemento	Peso atómico	Valencia	Equivalente químico
Cu	63.57 gr/mol	+2	$M_1 = 63.57/2$
Ag	107.88 gr/mol	+1	$M_2 = 107.88/1$
La relación que se cumple =			$\frac{M_1}{M_2} = 0.2947$

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Nota:

- La relación de los equivalentes químicos se cumple siempre y cuando no haya fenómenos secundarios que participen en la disolución de las especies depositadas.

### 2.2.1.2 Segunda ley de Faraday

El corolario menciona que: “Para una cantidad determinada de corriente eléctrica, el material depositado en el electrodo es directamente proporcional al peso equivalente del elemento que se reduce” (Lagos et al, 2016).

En base a este corolario, se concluye que la cantidad de material depositado en los electrodos, es proporcional a los equivalentes químicos donde se cumple que:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{PA_1/v_1}{PA_2/v_2}$$

Donde:

- *PA: pesos atomicos*
- *M: equivalente químico*
- *v: valencia*

### 2.2.2 Celdas electroquímicas

Las celdas electroquímicas son recipientes donde suceden reacciones químicas red-ox, mediante este mecanismo se puede generar o consumir energía eléctrica. “Está conformado por dos electrodos (cátodo y ánodo) las cuales se encuentran unidos por un hilo conductor a la fuente de energía, los electrodos están dentro de una solución electrolítica. Dichas soluciones están espaciadas físicamente, pero a través de un puente salino pueden intercambiar iones” (Gómez et al, 2002).

#### 2.2.2.1 Tipos de celdas

A las celdas electroquímicas también se les llama reactores electroquímicos, debido a que en su interior suceden reacciones de oxidación-reducción, causado por el flujo de la corriente eléctrica que pasa por los electrodos.

Para la clasificación de las celdas electroquímicas se puede seguir diferentes criterios. Una de ellas es la clasificación que se basa en el “tipo de flujo que presenta, el modo de circulación, el tipo de conexión electródica y el objetivo que presenta la celda” (Cañizares et al, 2008).

- Si se considera que el criterio de selección basada en la manera de como fluye el flujo a través de la celda, puede clasificarse en unidades de flujo vertical como flujo horizontal. La importancia de esta clasificación se debe a que se puede aprovechar los movimientos provocados por el hidrogeno y oxigeno que se genera en el proceso catódico y anódico de reducción y oxidación del agua, respectivamente.
- Si el criterio de selección se basa respecto al modo de circulación del agua a tratar en la celda, estas se clasifican en celdas de un solo canal o canales múltiples. La sencillez de su disposición es la ventaja que posee las celdas con arreglos múltiples.
- Si el criterio de selección se enfoca en el tipo de conexión electródica, entonces las celdas toman la clasificación de monoplares o bipolares donde su configuración de trabajo va de menor intensidad a mayor voltaje a diferencia del monopolar. La conexión de dos electrodos es la ventaja que proporciona la clasificación bipolar.

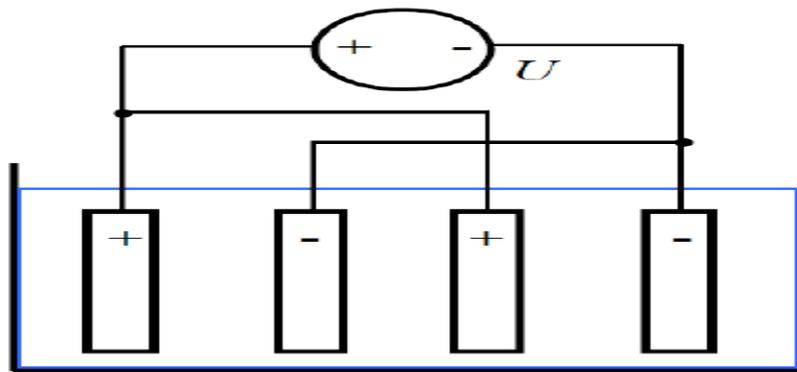


Figura 10: Configuración monopolar, arreglo en forma paralela de electrodos.

Fuente: Hedeş et al., 2019

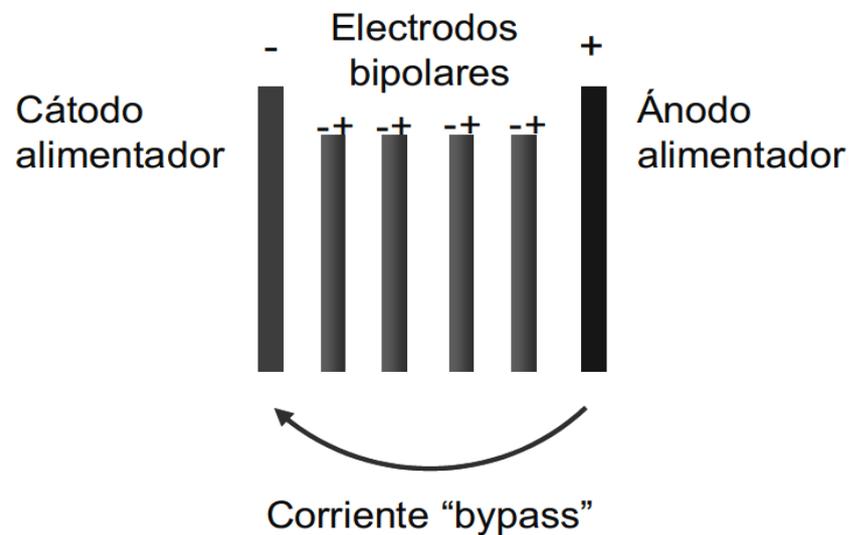


Figura 23: Configuración bipolar.

Fuente: Cañizares et al., 2008.

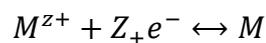
- Si tomamos en consideración que el criterio de selección se enfoca con la finalidad con la que se diseñó el reactor, las celdas pueden clasificarse en celdas de electro-floculación o electro-flotación.

Por otro lado, otros autores clasifican a las celdas electroquímicas en dos tipos: celdas galvánicas o celdas electrolíticas

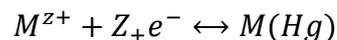
- Celdas galvánicas. – Son también llamadas “celdas voltaicas”, este tipo de celdas almacenan energía eléctrica y las reacciones que se llevan a cabo en los electrodos ocurren de manera espontánea la cual produce que los electrones fluyan desde el cátodo al ánodo. El flujo de estos electrones ocasiona un potencial eléctrico en la celda. Un ejemplo muy común de esta categoría es la celda de Daniell.
- Celdas electrolíticas. - En este tipo de celdas las reacciones no son espontáneas y también se debe suministrar energía para que suceda. Al suministrar corriente eléctrica, se producen reacciones red-ox.

### 2.2.2.2 *Electrodos*

- Electrodo metal-ion metal. – El electrodo es una pieza metálica que se encuentra sumergida en una solución que contiene el ion metálico, por ejemplo,  $\text{Cu}^{+2}/\text{Cu}$ ;  $\text{Pb}^{+2}/\text{Pb}$  y  $\text{Hg}_2^{+2}$ . La ecuación de reacción es:



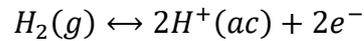
- Electrodo de amalgama. – El mercurio líquido está envuelto por una pasta de sulfato mercurioso u óxido mercúrico y una solución de una base. La ecuación de reacción es:



- Electrodo redox. – La reacción de oxidación – reducción se presenta en todos los electrodos, por ello se les denomina así. Por lo general el electrodo de metal inerte se encuentra sumergido en una solución que está compuesta por dos especies solubles, pero con estados de oxidación diferentes. La ecuación de reacción es:



- Electroodos de gas. – Este tipo de electroodos se encuentra formado por un colector inerte de electrones; por ejemplo, el platino o grafito, la cual se encuentra en contacto con un gas y un ion soluble. La ecuación de reacción es:



### ***2.2.3 Electrocoagulación***

Los contaminantes que se encuentran en las AR, son eliminados de una forma tradicional, donde se usan coagulantes químicos que facilitan la neutralización de las cargas de partículas (suspendidas) o que son halladas en forma de coloides, este proceso da como resultado la disminución de repulsión entre partícula, la cual genera aglomerados las cuales serán eliminadas por un proceso de precipitación.

En la construcción de la planta de tratamiento aguas residuales - PTAR en Londres de 1889, registra el primer proceso de electrocoagulación (Hedeş et al & Tudoran, 2019). El proceso de electrocoagulación se enfoca en la aplicación de un campo eléctrico en una celda electrolítica para la eliminación de contaminantes presentes en una solución.

La EC (electrocoagulación) es una metodología de tratamiento para AR que ha empezado a desarrollarse en las últimas décadas, pero su inicio remonta al año 1909, la cual fue patentada por los Estados Unidos (Domínguez et al, 2011).

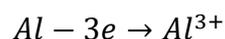
Mollah (como se menciona en Arango & Garcés, 2007) nos dice que la: La electrocoagulación es un proceso alternativo a la coagulación realizada por sustancias químicas. En un proceso electrolíticos el coagulante se origina por las reacciones REDOX (oxidorreducción) que se llevan a cabo entre el medio acuoso y los electroodos, la cual es promovida por el flujo de una corriente eléctrica.

### 2.2.3.1 Principios de reacción

Los coagulantes más eficientes en el proceso de floculación de partículas son los cationes  $Fe^{2+}$  o  $Al^{3+}$ , por esto en las celdas de electrocoagulación se usan electrodos de aluminio o de hierro. El aluminio se descompone en iones por la hidrólisis, las cuales pueden generar cadenas largas de AL-O-AL-OH, este compuesto presenta gran potencial de absorción de contaminantes.

Chen (como se citó en Domínguez et al., 2011) menciona que las reacciones químicas que suceden en el ánodo, son las que se muestran a continuación:

Para el ánodo de aluminio:



Para el ánodo de hierro:

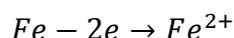


Tabla 2: Reacciones anódicas del electrodo de aluminio y hierro.

Condiciones	Electrodo de Aluminio	Electrodo de Hierro
Alcalinas	$Al^{+3} + OH^{-} \rightarrow Al(OH)_3$	$Fe^{+2} + OH^{-} \rightarrow Fe(OH)_2$
Acidas	$Al^{+3} + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3H^{+}$	$4Fe^{+2} + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe^{+3} + 4OH^{-}$

Nota. Fuente: Elaboración propia.

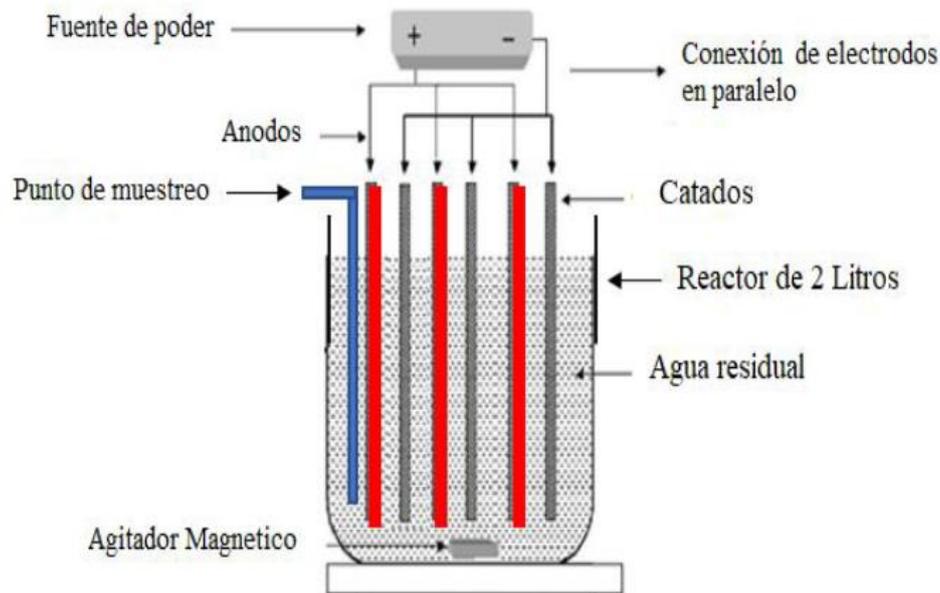


Figura 27: Esquema genérico de una celda de electrocoagulación.

Fuente: Ruiz (citado en Chaves, 2021).

### 2.2.3.2 Electrodo de aluminio

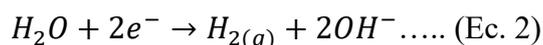
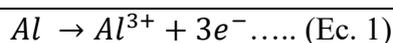
Los electrodos de aluminio pueden presentar una pasividad, la que genera problemas en respecto al proceso de tratamiento de aguas residuales industriales por electrocoagulación. Ante la presencia de aire libre y un medio acuoso, las partículas pasivas se originan sencillamente en la superficie de aluminio o en sus diferentes aleaciones.

“La formación de película de  $Al_2O_3$  hace que el aluminio sea resistente a la corrosión. Esta película se origina en el electrodo anódico e impide la desintegración del aluminio, lo cual evita la transferencia de carga entre los electrodos y el medio acuoso. La pasivación de los electrodos anódicos de sacrificio, presenta un alza de costos para el tratamiento de

aguas residuales por el método de electrocoagulación, debido a que se consume electricidad en exceso” (Prieto et al., 2014).

El Al es un elemento mucho más favorable a las picaduras a diferencia de otros metales. Los investigadores presentan como una alternativa, frente a esta problemática, la adición de electrolitos de soporte, como es el caso del NaCl (cloruro de sodio), con la finalidad de disminuir la pasivación de los electrodos anódicos y así aumentar la conductividad eléctrica del medio.

*Tabla 3: Reacciones presentes en el proceso de electrocoagulación con el uso del aluminio.*



Nota. Fuente: Muñoz et al., 2022.

- La primera reacción se lleva a cabo en el ánodo.
- La segunda reacción se lleva a cabo en el cátodo.
- El  $Al^{3+}$  origina que la solución pase a una especie hidrolizada y monomérica hasta el punto de que se formen  $Al(OH)_3$ .

García et al. (como se mencionó en Muñoz et al., 2022) El proceso de electrocoagulación presenta cuatro mecanismos fundamentales: atrapamiento de material particulado, absorción de las partículas, neutralización de cargas iónicas y por último la formación de aglomerados de los grupos funcionales presentes en la muestra a tratar.

### ***2.2.3 Los envases de lata***

La historia nos dice que, a inicios del siglo XX se buscó envasar bebidas en latas. En el año 1935, Krueger comercializó la primera bebida (cerveza) enlatada. A mediados de los años 60, se produjo un gran avance tecnológico, debido a que se implementó una apertura fácil, la cual trajo consigo un aumento de consumo de bebidas enlatadas.

Las latas para las bebidas suelen ser fabricadas de aluminio o de acero (conocido anteriormente como hojalata), pero esto depende principalmente por la región.

En estos tiempos, la fabricación de todas las latas para las bebidas está compuesta fundamentalmente por el aluminio, este elemento forma el 8% de la corteza terrestre. La bauxita es de donde se extrae el aluminio.

El Aluminio es un elemento que se recicla al 100%, sin perder sus propiedades naturales y mecánicas, la ventaja es que en la recuperación o reciclaje de este mineral es accesible y no consume grandes cantidades de energía. Por otro lado, la desventaja que presenta este elemento es sus altos costos de operación para obtenerlos como tal, hablando en términos económicos y energéticos.

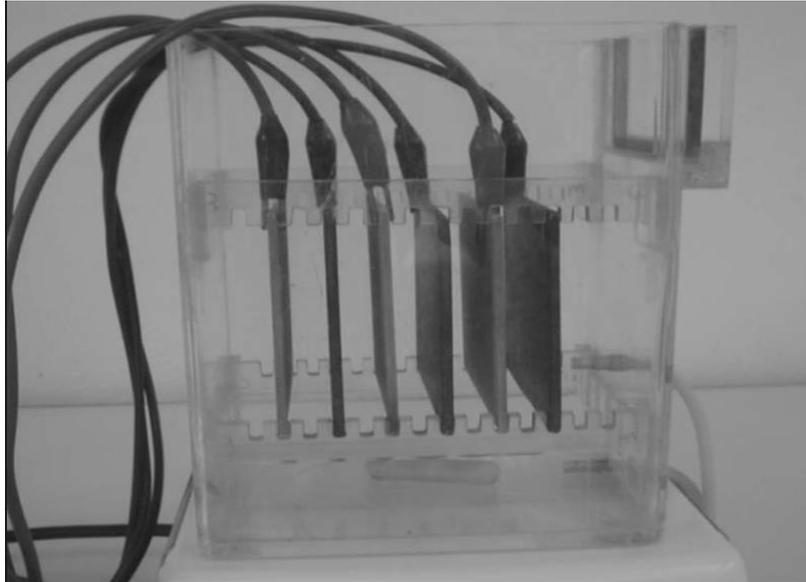


Figura 36: Vista de la formación de los electrodos.

Fuente: Arango & Garcés, 2007.

### ***2.2.3.1 Recuperación de latas de bebidas***

Con el avance tecnológico, las latas de Aluminio se separan de los demás residuos mediante separación magnética. Cabe señalar que las latas de Aluminio representan una parte muy importante, y la de mayor valor. La tecnología de corrientes inducidas hace posible la separación magnética.

El proceso de recuperación de latas, ha mejorado notablemente en estos últimos años, el método de la fragmentación, la separación magnética y en ciertos casos el desestañado químico, la cual permite darle un valor agregado al metal recuperado.

Para el proceso de recuperación de las latas, cada uno de ellas se limpió y se quitó la laca, se quitó también la tapa debido a que esta aleada con manganeso. Reyes et al. (como se citó en Zamudio et al., 2016) Se eligió las latas de aluminio para experimentar, gracias a su estabilidad después del reciclaje, este experimento resulto ser útil para la fabricación de piezas de vehículos con un valor agregado alto.

### 2.2.3.2 Presentación de las latas

Tabla 4: Aluminio para bebidas de 12 OZ.

Especificaciones	mm	in
Dimensiones	52.40/66.13 * 122.22	202/211 * 411
Diámetro	52.40+/-0.25	211
Diámetro cónico del fondo	52.43	202
Altura	122.22	411
Material	Aluminio	
Volumen	355 ml	12 oz

Nota. Fuente: <https://www.envases.mx/es/>



Figura 45: Presentación de lata de aluminio de 12 oz.

Fuente: <https://www.envases.mx/es/>

### ***2.2.4 Tratamiento de aguas***

Los factores que afectan la selección de un proceso adecuado para el tratamiento de agua residuales son, de acuerdo a Ramalho (2021):

- Propiedades del agua residual.
- Calidad del efluente de vertimiento.
- Costos de operación.

Para la metodología respecto al tratamiento de aguas residuales, se agrupan en tres métodos convencionales, siendo las siguiente: tratamiento preliminar, tratamiento primario y tratamiento secundario.

- Tratamiento preliminar. – Este proceso se dedica enfáticamente en la preparación de las aguas residuales, básicamente con la finalidad de proteger y conservar las instalaciones de posibles averías, obstrucción de canales, entre otros; debido a los contaminantes de gran tamaño que traen consigo las aguas. Este proceso consta de las siguientes operaciones: de tamices, desarenadoras, desengrasadores.
- Tratamiento primario. - Este proceso es constituido por operaciones físicas. La finalidad que busca este proceso es la remoción de material disuelta o sedimentable, pero también contribuye con la remoción de entre 25% al 40% de carga orgánica. El proceso esta constituido por las siguientes operaciones: Sedimentación primaria, Flotación Precipitación química o electrocoagulación, sedimentación y filtración.

“La electrocoagulación se ve favorecida por una demanda pequeña de corriente eléctrica, debido a esto, al proceso se le puede suministrar energía verde mediante molinos eólicas, paneles solares e incluso celdas de combustible” (Cañizares et al., 2008).

“La coagulación de las partículas está relacionada con el aumento de la densidad de las mismas y el poder del coagulante químico a usar, los productos químicos que se usan están basados principalmente en el aluminio y el hierro” (Ramalho, 2021).

- Tratamiento secundario. – La presencia de los microorganismos es muy importante para este proceso. Los compuestos orgánicos que se encuentran en el agua no son eliminados en su totalidad en el tratamiento primario, para ello se debe realizar un tratamiento necesariamente biológico. Los lodos activados es el proceso biológico más común en una PTAR, donde la materia disuelta se convierte en sólidos sedimentables floculantes.

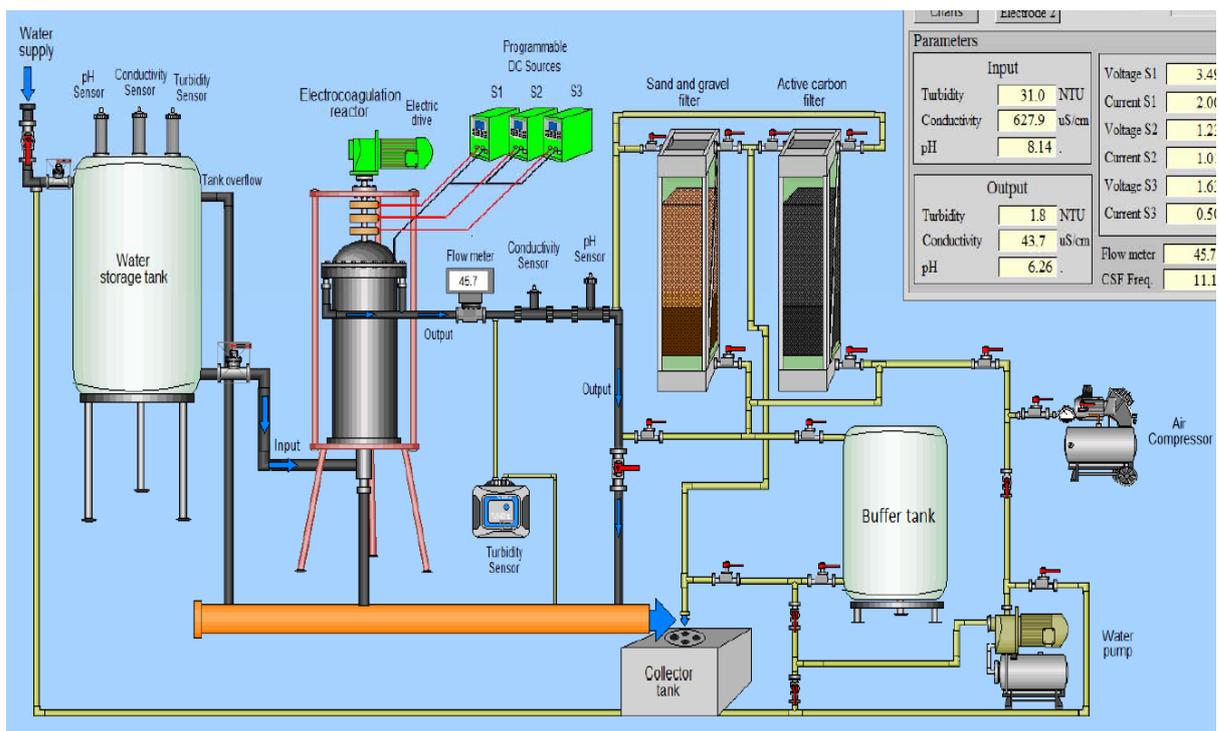


Figura 53: Montaje experimental de la nueva celda Electrocoagulación.

### 2.3 Definición de términos básicos

- Celda electroquímica. – “En un proceso electroquímico, la celda es un Reactor Bach, la forma más sencilla en la que se presenta, es una cubeta, donde los electrodos se encuentran en forma de placas ordenadas paralelamente conectadas en serie a una fuente de poder” (Arango & Garcés, 2007, p.57).
- Coagulación asistida electroquímicamente. – “Este proceso no es más que el proceso de electrocoagulación, la ventaja de este proceso es que nos ayuda a mejorar la dosificación de reactivos y presenta un ahorro significativo de los costos de reacción” (Cañizares et al., 2008, p.28).
- Coloides. – “Es una forma de contaminante que se encuentra presente en la composición de las aguas residuales, se caracterizan por ser materiales particulados, y poseen un tamaño comprendido de entre los 1nm y 1000 nm” (Cañizares et al., 2008, p.28).
- Color aparente. – “Para el estudio del agua, el color está relacionado con la turbidez de la misma” (Sierra, 2011, p.55-56).
- Color real. – “El agua después de haber pasado por operaciones unitarias, muestra el color real, por lo general el agua es incoloro” (Sierra, 2011, p.55-56).
- Densidad de corriente eléctrica. – Es la magnitud que calcula el movimiento medio de las cargas que fluyen a través de un material, las unidades en la que se mide son  $A/cm^2$ .
- Electrocoagulación. – “Es un proceso electroquímico, donde se desestabilizan materia o contaminantes disueltos, suspendidos o emulsificados en un medio acuoso, el método que aplica es la inducción de corriente eléctrica a través de placas metálicas llamados electrodos” (Magaña et al., 2020).

- Electrodo. – Materia conductor que se encuentra en contacto con la muestra de agua, para el tratamiento de aguas se usan electrodos de aluminio o hierro.
- Electro-floculación. – “Este proceso se ve favorecido por el campo eléctrico provocado por los electrodos, la cual trae como consecuencia el choque entre colides y da paso a la floculación dentro de la celda electroquímica. Esto reduce gastos al no haber un agitador mecánico” (Cañizares et al., 2008, p.32).
- Oxidación. – Sucede cuando una sustancia o metal reacciona al entrar en contacto con el oxígeno. En un proceso electroquímico, un elemento o especie se oxida cuando pierde electrones.
- Red-ox. – Se le conoce también como proceso de oxido-reducción (reacción con transferencia de electrones).
- Reducción. - En el proceso electroquímico la reducción sucede cuando un ion o átomo gana electrones.
- Sistemas de electrocoagulación. – “Estos sistemas por lo general son construidos a partir de electrodos planos, el agua (que se desea tratar) fluye a través de los espacios que hay entre ellas” (Hedeş et al., 2019).
- Turbiedad. – “Capacidad que posee cierta muestra de agua para obstaculizar el paso de la luz incidente. Una de los factores principales que provoca la turbidez del agua es la presencia de material disuelta” (Sierra, 2011, p.55).

## **2.4 Formulación de hipótesis**

### ***2.4.1 Hipótesis general***

Las latas de bebidas sirven para construir los electrodos de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas turbias.

### ***2.4.2 Hipótesis específica***

- Una Identificación adecuada de las variables que intervienen en el proceso de electrocoagulación nos permitirá la construcción de la celda con electrodos de latas recicladas
- El dimensionamiento de la celda de electrocoagulación, estará relacionada directamente con la cantidad de electrodos a usar.
- El dimensionamiento de los electrodos de aluminio, se relacionan directamente con el tipo de envase que se pretende reciclar.

### **2.5 Operacionalización de variables**

Variables	Definición conceptual	Definición de variables	Dimensiones	Indicadores
<b>Celdas de electrocoagulación</b>	Son reactores tipo Bach, su funcionamiento se basa en los principios de la electroquímica.	Las celdas de electrocoagulación son una alternativa para el proceso de coagulación de aguas turbias. La dosificación del coagulante es más controlada y precisa, y los costos de procesamiento son bajos.	Especificaciones técnicas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo de procesamiento.</li> <li>• Voltaje.</li> <li>• Amperaje.</li> </ul>
	Este compuesto por una fuente que suministra energía eléctrica, metales que funcionan como electrodos (por lo general se usa el aluminio y el hierro), solución o muestra y la cuba o celda electrolítica donde se lleva a cabo las reacciones red-ox.		Especificaciones físicas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Largo.</li> <li>• Ancho.</li> <li>• Alto.</li> <li>• Electrodo de aluminio reciclado.</li> </ul>
<b>Aguas turbias</b>	El agua turbia es aquel que presenta un color aparente, es decir que tiene un aspecto desagradable y sucia para el observador. La turbidez es un parámetro de medida, donde los haces de luz son dispersados al momento de querer pasar por el medio de la muestra.	Las aguas turbias serán determinadas a través de los parámetros. La medición y el análisis de datos se realizarán en el laboratorio de la UNJFSC.	Parámetros.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura.</li> <li>• Turbiedad.</li> <li>• pH</li> <li>• STD</li> </ul>

## CAPITULO III: METODOLOGÍA

### 3.1 Diseño metodológico

#### *3.1.1 Diseño y fabricación de la celda de electrocoagulación*

Las dimensiones de la cuba de electrocoagulación, se relaciona con un sistema de operación semi continuo (tipo Bach), donde se desarrolla a nivel de laboratorio. La cuba de electrocoagulación operará con una capacidad de 3.5 lt.

El vidrio grueso transparente (1cm), es el material utilizado para la ensamblar la celda, la cual tiene una forma rectangular paralelepípedo, donde se sumergirán los electrodos de aluminio (reciclado) de forma cuadrangular (10 cm x 10 cm).

El material utilizado fue el vidrio grueso transparente ya que nos permite observar de una manera clara el proceso físico químico, por la cual pasara el agua residual, que se presenta en el proceso de electrocoagulación.

Para la construcción de la cuba, se consideran tres zonas, el criterio de separación de cada una de ellas esta demarcado por las principales procesos físicos y químicos.

- Zona de reacción: zona donde se encuentran sumergidos los electrodos, y donde se lleva a cabo el proceso de electrocoagulación.
- Zona de Sedimentación: donde ocurre la sedimentación de las partículas sedimentables (lodos).
- Zona de Flotación: En esta zona (parte superior) se van a ir acumulando los flocs productos de la electrocoagulación.

Para ensamblar la cuba se instaló 2 tomadores de muestra (para cual se optó por usar dos caños de plástico, lo cual nos permite tomar muestras de manera sencilla y adecuada), la siguiente imagen muestra el modelo de la cuba electrolítica:

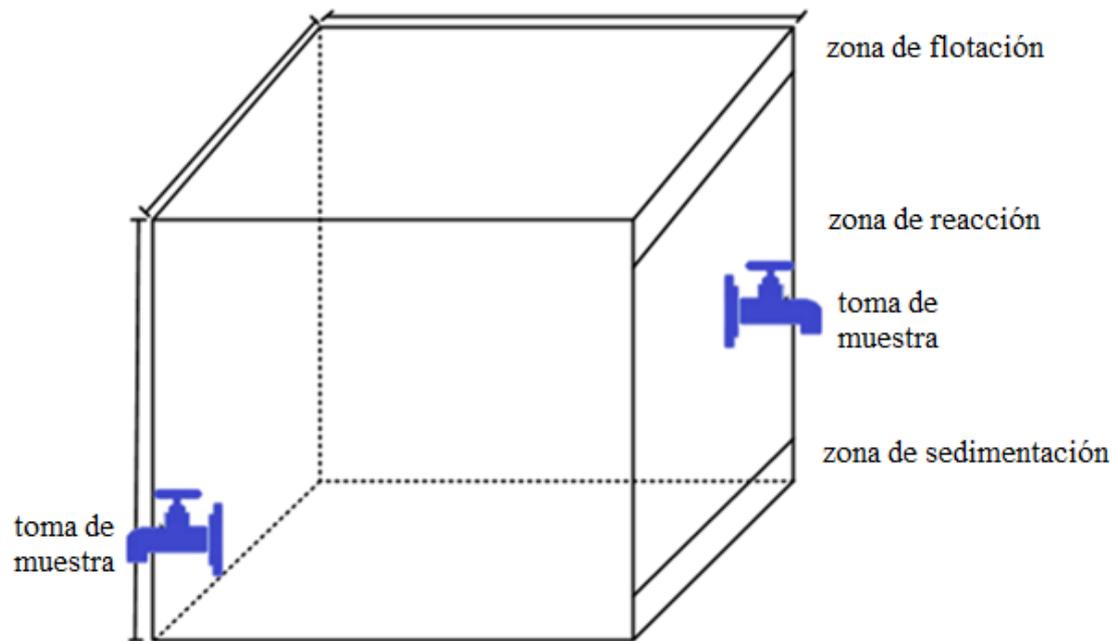


Figura 62: Zonas en la celda de electrocoagulación.

Fuente: Elaboración propia.

A la celda de electrocoagulación se le colocaron dos caños de plástico en la cual el primer caño está a una altura de 3 cm y el segundo caño a la altura de 10 cm, estos serán utilizados como un tomador de muestra; también se colocó 2 soportes paralelos de madera de 15 cm de largo c/u que serán de ayuda para impedir el hundimiento de los electrodos los cuales están ubicados a 15 cm de la base de la celda de electrocoagulación.

- *Electrodos*

Los electrodos están hechos de material reciclado (aluminio), esto se decidió porque se busca la disminución del impacto ambiental ya que el aluminio reciclado es accesible de conseguir. Los electrodos son cuadrados, tienen una dimensión de 10 cm x 10 cm de largo por ancho.

- *Fuente de poder*

La fuente de poder utilizado para los ensayos de tratamiento de agua turbia, regula la intensidad de corriente que se suministrara a la cuba durante el proceso de electrocoagulación, sus características son: capacidad de suministro de Voltaje de 0 a 30 V y de 0 a 5 Amperios, estos parámetros son monitoreados con medidores de voltaje y amperaje. La corriente continua se abasteció utilizando cables de uso eléctrico N°18 y terminales cocodrilos, las cuales son conectados a las placas de aluminio (reciclado).



Figura 71: Suministrador de energía.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2. Población y muestra

#### 3.2.1. Población

Se consideró como población de estudio la localidad de Huacho, de donde se recolectaron algunos envases (de aluminio) de bebidas. Las latas se recolectaron de las playas, mercados y comercios locales.

### 3.2.2. Muestra.

Se utilizaron como muestra 20 latas, entre envases de bebidas gaseosas y cervezas, las cuales se utilizaron para la elaboración de los electrodos de aluminio.

## 3.3 Técnicas de recolección de datos

### 3.3.1 *Técnicas a emplear*

Las técnicas empleadas para la recolección de datos fueron:

- La Observación, que se utilizó para realizar las caracterizaciones de las aguas que sirvieron para evaluar el funcionamiento de la celda.
- El análisis documental, que nos sirvió para recoger información respecto al diseño de la celda.

### 3.3.2 *Descripción de los instrumentos*

La presente investigación utilizó los siguientes instrumentos para analizar las muestras de agua

- Medidor de oxígeno disuelto MW (Milwaukee 600), para la medición del oxígeno disuelto presente en las muestras de agua.
- Turbidímetro portátil 2100q, para la medición de la turbidez de las aguas a evaluar.
- pHmetro de Mesa Multiparamétrico - Adwa AD8000 (pH/mV/EC/TDS/Temperatura), para la medición del pH, RPM, conductividad, STD presente en la muestra a tratar y la muestra tratada.

## 3.4. Técnicas para el procesamiento de la información

Para procesar la información, se utilizaron el procesador de texto Microsoft Office y el programa Excel para hacer los cálculos y el análisis de los datos, como el tiempo de

tratamiento, oxígeno disuelto, la turbidez, la conductividad, pH; también los electrodos de aluminio y el espaciamiento entre las placas (1cm).

- Ensayos con agua de canal de regadío

Luego de realizar la prueba con el de canal de regadío de la ciudad de Huacho se pudo verificar y optimizar las condiciones de operación de la Cuba de electrocoagulación, se procedió a realizar la prueba con el agua de canal de regadío, siguiendo el mismo procedimiento que se realizó con el agua potable.



Figura 80: Pruebas de funcionamiento del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

### ***3.4.3 Procedimiento experimental***

1. Se armó la celda de electrocoagulación con el vidrio grueso, dentro de la celda se colocaron los soportes de madera que ayudarán a sujetar las placas de aluminio y por último también se le coloco 2 caños a la celda que tendrán la función de tomador de muestra.
2. Al tener la celda armada se realizó a colocar las placas de aluminio (10) unido con los terminales de cocodrilo (rojo y negro) cada uno que estarán sujetos a los

soportes. Con las placas ya listas se procedió a colocar los 2 sobrantes de los terminales de cocodrilo a la fuente de poder apagada

3. Al tener todo listo en la celda de electrocoagulación se procedió hacer el llenado de la celda con el agua de canal de regadío (3.5 litros) en donde luego se procedió a realizar el prendido de la fuente de energía con 5 de ampere y 10 de voltaje con un tiempo de 30 minutos.
4. En los primeros minutos podemos observar cómo se va dando el proceso de electrocoagulación en donde vemos que se va dando una separación y en la parte de arriba del agua se van formando las primeras burbujas de hidrogeno.
5. Al cumplir con el tiempo estimado vemos que dentro de la celda se ha dado la separación de las impurezas presentes en el agua y también se aprecia que en la parte de arriba del agua se formaron gran cantidad de burbujas de hidrogeno.
6. Por último, se realizó a sacar el agua tratada para depositarlo en un recipiente para luego utilizarlo en el riego de áreas verdes.

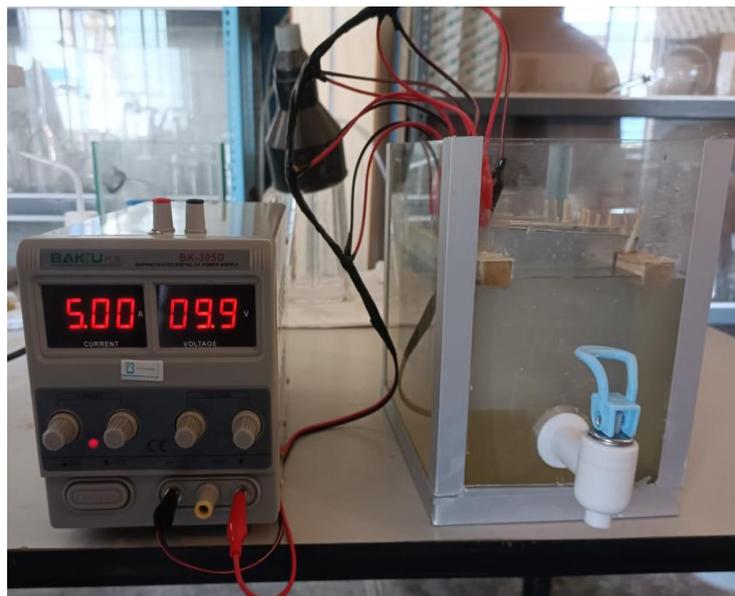


Figura 89: Pruebas de agua de canal de regadío.

Fuente: Elaboración propia.

## CAPITULO IV: RESULTADOS

### 4.1. Dimensionamiento de la celda

La cuba de electrocoagulación ensamblada fue construida con placas de vidrio con un espesor de 0,5 cm, de forma de un paralelepípedo rectangular, cuyas medidas se presentan en la figura 12, donde:

a: ancho; b: largo y c: altura.

La muestra de agua a tratar se llena hasta alcanzar 14 cm de altura desde la base, en la parte superior, la zona de flotación, se deja un espacio de 6 cm donde se acumularán los flóculos.

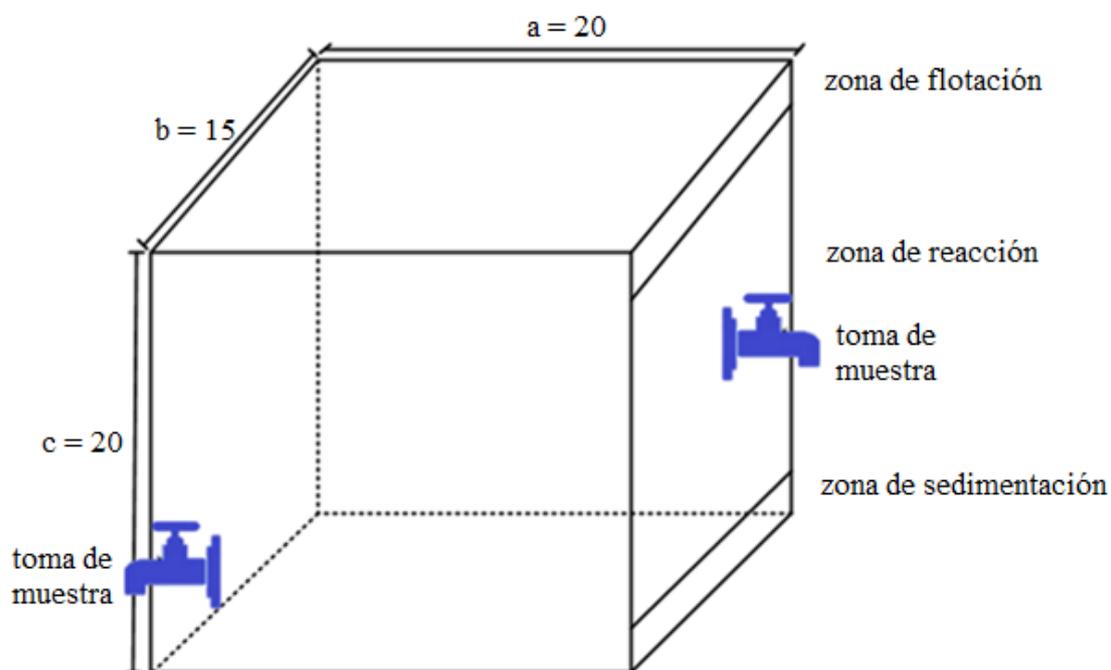


Figura 98: Dimensiones de la celda.

Fuente: Autoría propia.



Figura 107: Vista frontal de la celda.

Fuente: Autoría propia.

#### 4.2 Electroodos

Las placas de aluminio utilizados para las pruebas de electrocoagulación serán de 1 mm de espesor.



Figura 116: Electrodo rectangular de aluminio reciclado.

Fuente: Autoría propia.

Son 10 placas de aluminio, que se usaron como electrodos en el cual 5 serán tomados como ánodo y los 5 restantes como cátodo.

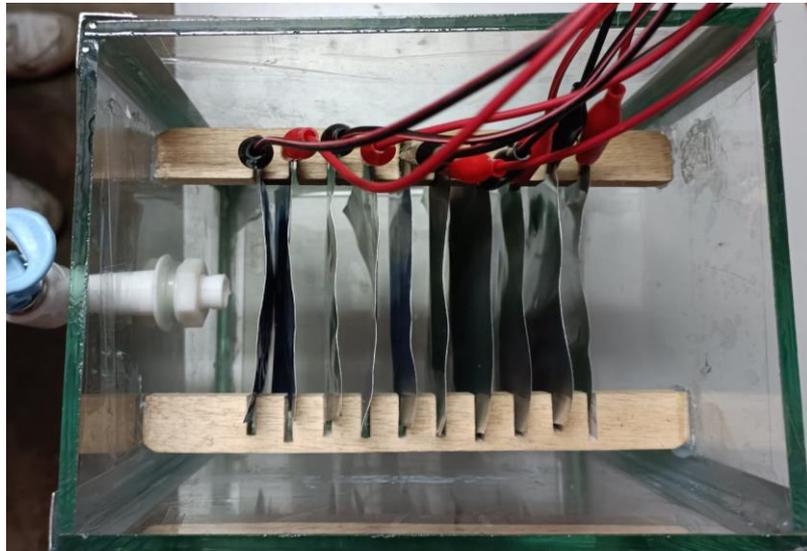


Figura 125: Celda de electrocoagulación con electrodos de aluminio.

Fuente: Autoría propia.

### 4.3 Sistema de electrocoagulación

El sistema de electrocoagulación está conformado por: la fuente de poder, la cuba electrolítica y los electrodos. La celda de electrocoagulación funciona sin inconvenientes.

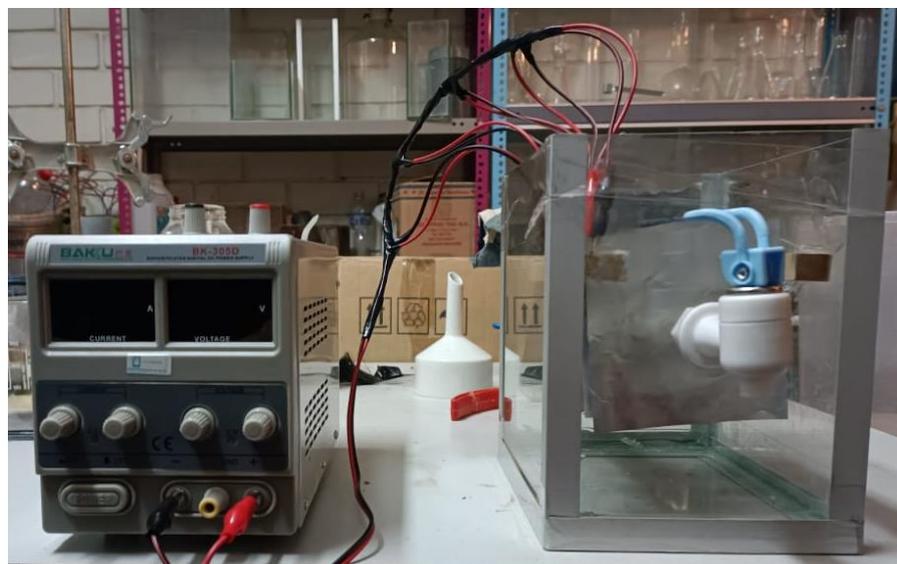


Figura 134: Vista del sistema para el proceso de electrocoagulación.

Fuente: Autoría propia

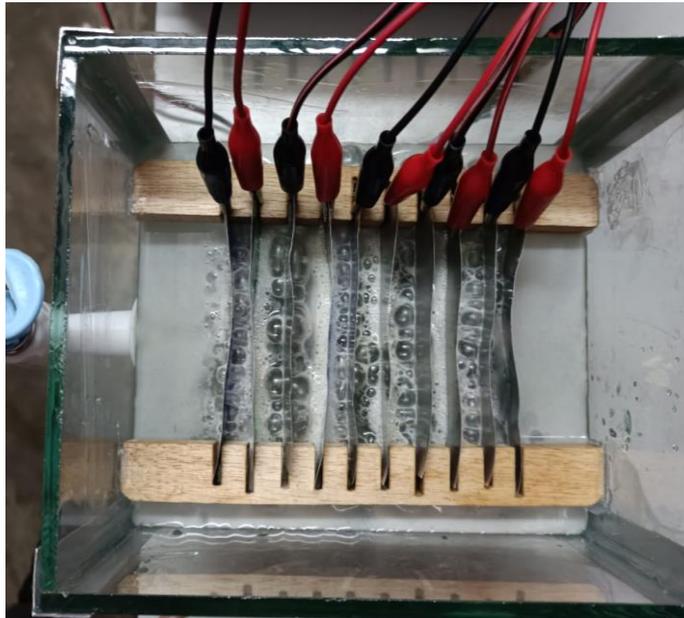


Figura 143: Celda electrolítica en funcionamiento.

Fuente: Autoría propia.

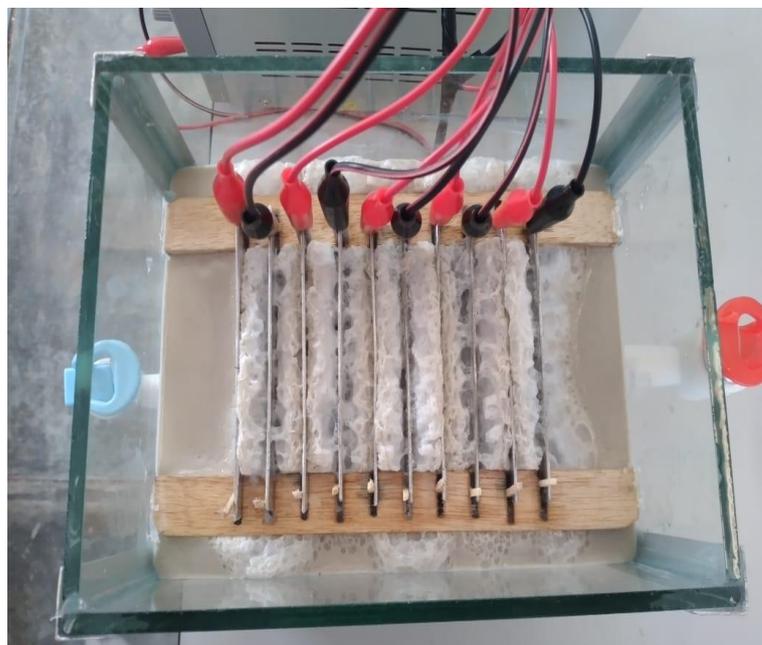


Figura 152: Formación de burbujas de  $H_2$  con agua de canal de regadío.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4 Caracterización físico química del agua de muestra

- Caracterización antes del proceso.

Tabla 5: Medición de los parámetros establecidos en el estudio - 1era.

Parámetros	Resultados	Unidad	Temperatura de muestra
OD	6.6	mg/lt	21°C
Turbidez	61.1	NTU	21°C
pH	8.48	...	21.3°C
Conductividad	2.21	mS/cm <sup>2</sup>	21.4°C
SST	1.10	ppm	21.4°C

Nota. Fuente: Autoría propia.

- Caracterización después del proceso.

Tabla 6: Medición de los parámetros establecidos en el estudio - 2da.

Parámetros	Resultados	Unidad	Temperatura de muestra
OD	4.4	mg/lt	21°C
Turbidez	41.1	NTU	21°C
pH	9.12	...	21.3°C
Conductividad	1991	μS/cm <sup>2</sup>	21.4°C
SST	997	Ppm	21.4°C

Nota. Fuente: Autoría propia.

## CAPITULO V: DISCUSIONES

Tabla 7: Dimensionamiento de celdas de electrocoagulación, en el trabajo realizado.

	Dimensionamiento
Ancho	20 cm
Largo	15 cm
Alto	20 cm
Volumen	6000 cm

Nota. Fuente: Autoría propia.

Tabla 8: Dimensionamiento de celdas de electrocoagulación, según Arango y Garcés.

	Dimensionamiento
Ancho	18 cm
Largo	10.5 cm
Alto	14.1 cm
Volumen	2664.1 cm

Nota. Fuente: Arango & Garcés, 2007.

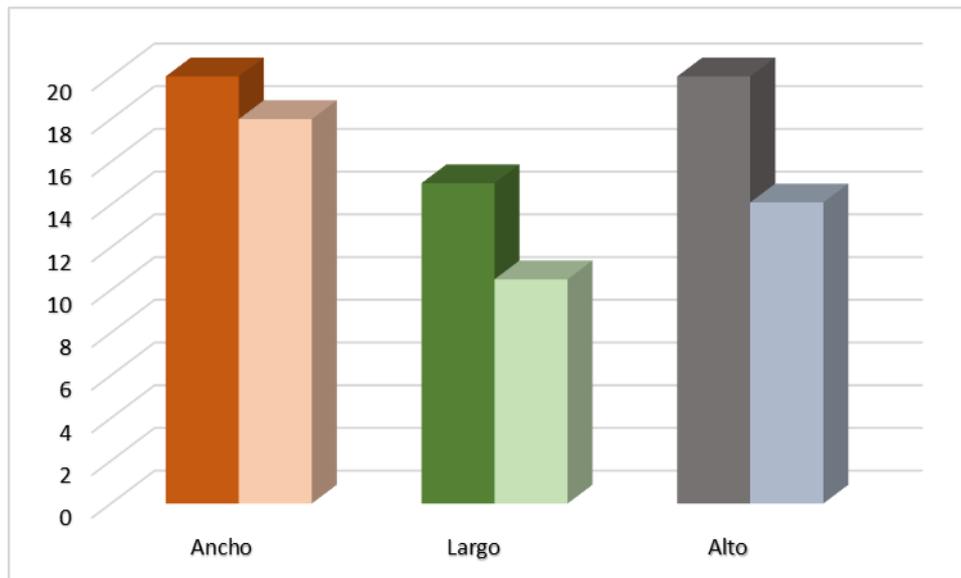


Figura 161: Medidas del dimensionamiento de las celdas.

Fuente: Elaboración propia.

### Interpretación

Los valores de las tablas 7 y 8 son representadas en la figura 19. Donde se observa que las medidas del dimensionamiento de la cubeta que uso el autor frente a las de Arango y Garcés, difieren en: el ancho varía en 2.0 cm, el largo varía en 4.5 cm y el alto varia en 5.9 cm.

Tabla 9: Dimensionamiento de electrodos, en el trabajo realizado.

	Dimensionamiento
Ancho	10 cm
Largo	10 cm
Espesor	1 mm
Forma	Cuadrada

Tabla 10: Dimensionamiento de electrodos, según Arango y Garcés.

	Dimensionamiento
Ancho	9 cm
Largo	9 cm
Espesor	3 mm
Forma	Cuadrada

Nota. Fuente: Arango & Garcés, 2007.

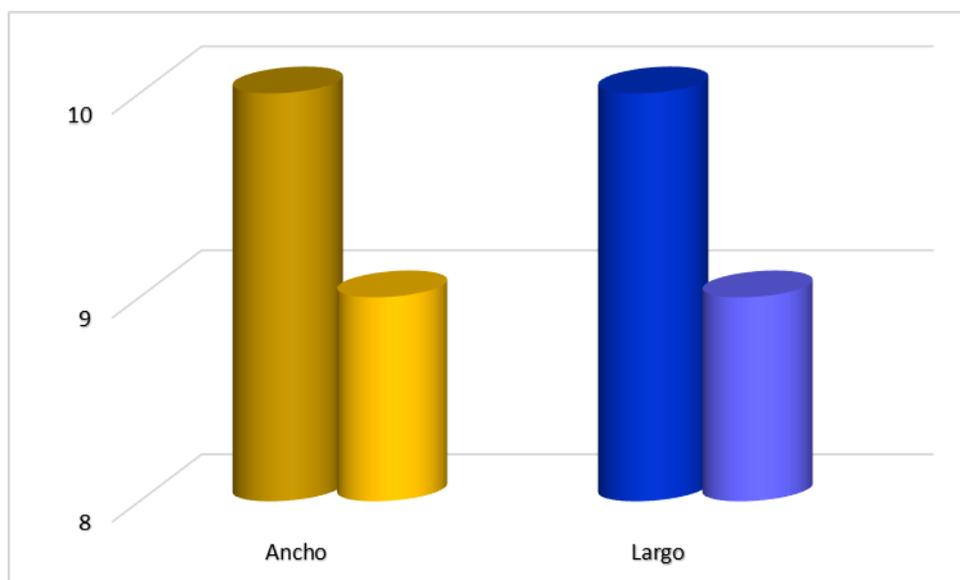


Figura 170: Dimensionamiento de electrodos.

Fuente: Elaboración propia.

### Interpretación

Los valores de las tablas 9 y 10 son representadas en la figura 20. Donde se observa que las medidas del dimensionamiento de los electrodos que uso el autor frente a las de Arango y Garcés, difieren en: el ancho varía en 1.0 cm, el largo varía en 1.0 cm. Ambos electrodos son de forma cuadrada.

---

 Tabla 11: Espesor de electrodos, de la celda de electrocoagulación.
 

---

	Media del trabajo	Media según Arango y Garcés
Espesor	1 mm	3 mm

---

Nota. Fuente: Autoría propia.

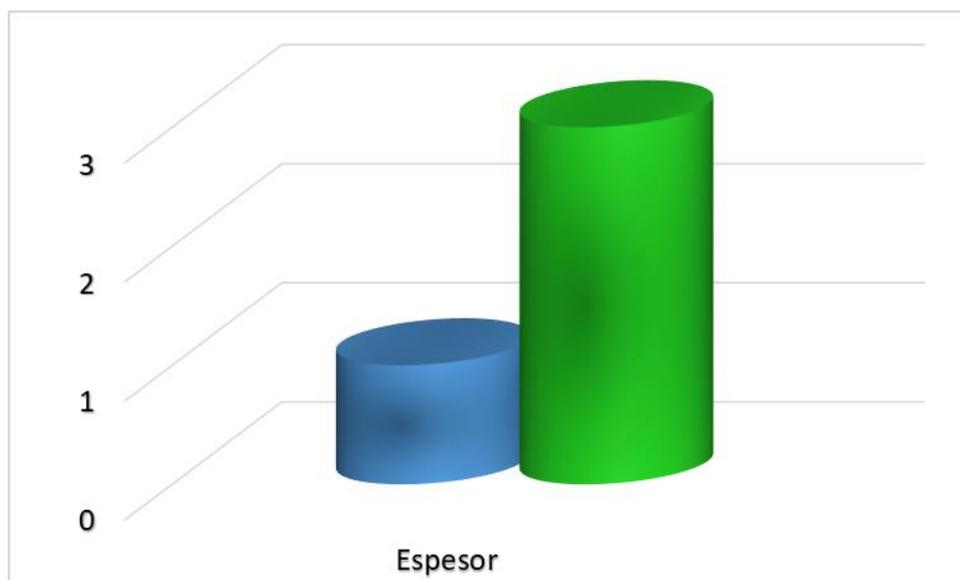


Figura 179: Espesor de los electrodos.

Fuente: Elaboración propia.

### Interpretación

Los valores de la tabla 11 es representada en la figura 21. Donde se observa que las medidas del espesor de los electrodos que uso el autor frente a las de Arango y Garcés, difieren en 2 mm (espesor de los envases de latas).

Tabla 12: Variables de funcionamiento del sistema.

	Sistema	Unidad
Espaciamiento de electrodos	1	cm
Cantidad de electrodos	10	Unidades
Amperaje	5	A
Voltaje	10	V
Tiempo	30	Minutos

Tabla 13: Variables de fruncimiento del sistema, según Arango y Garcés.

	Sistema	Unidad
Espaciamiento de electrodos	0.1	cm
Cantidad de electrodos	6	Unidades
Amperaje	25	A
Voltaje	16	V
Tiempo	15	Minutos

Nota. Fuente: Arango & Garcés, 2007.

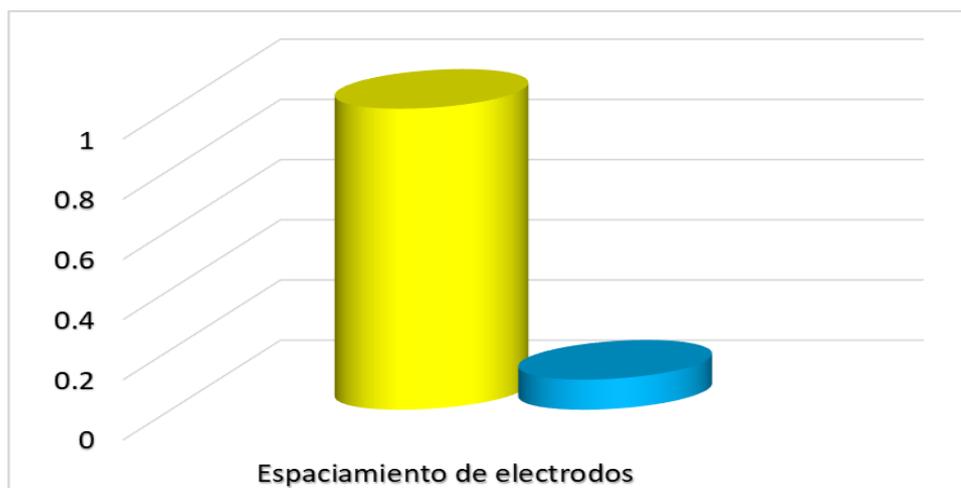


Figura 188: Espaciamiento de electrodos.

Fuente: Elaboración propia.

### Interpretación

Los valores de las tablas 12 y 13 son representadas en la figura 22 y 23. Donde se observa que el espaciamiento de los electrodos en el sistema, que uso el autor frente a las de Arango y Garcés, difieren en 0.9 cm.

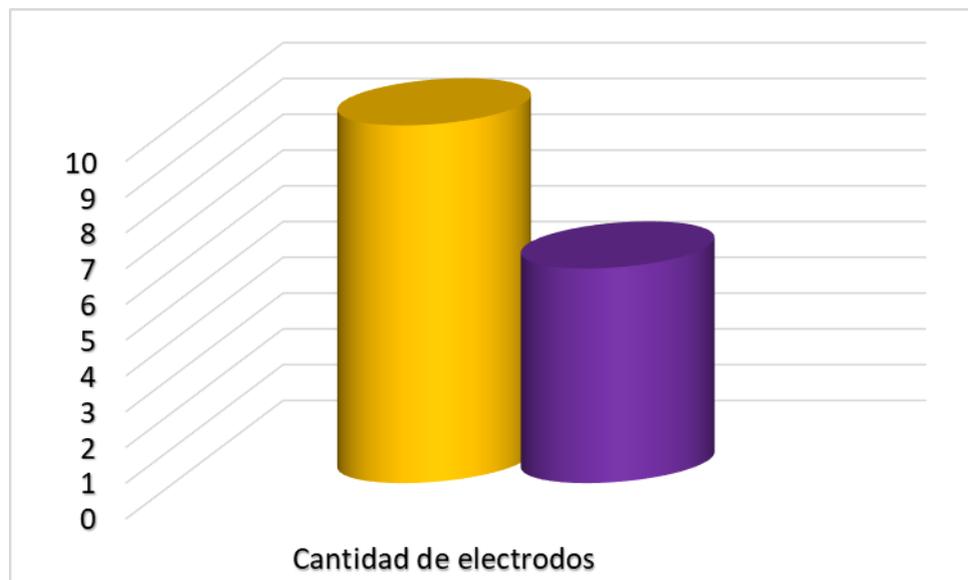


Figura 197: Numero de electrodos.

Fuente: Elaboración propia.

### Interpretación

En el sistema de electrocoagulación Arango y Garcés, emplearon 6 placas de aluminio como electrodos. Mientras en el trabajo de investigación se usó 10 placas de aluminios como electrodos. La diferencia es de 4 placas, pero los resultados muestran que la celda de 6 placa tuvo una mejor remoción turbidez.

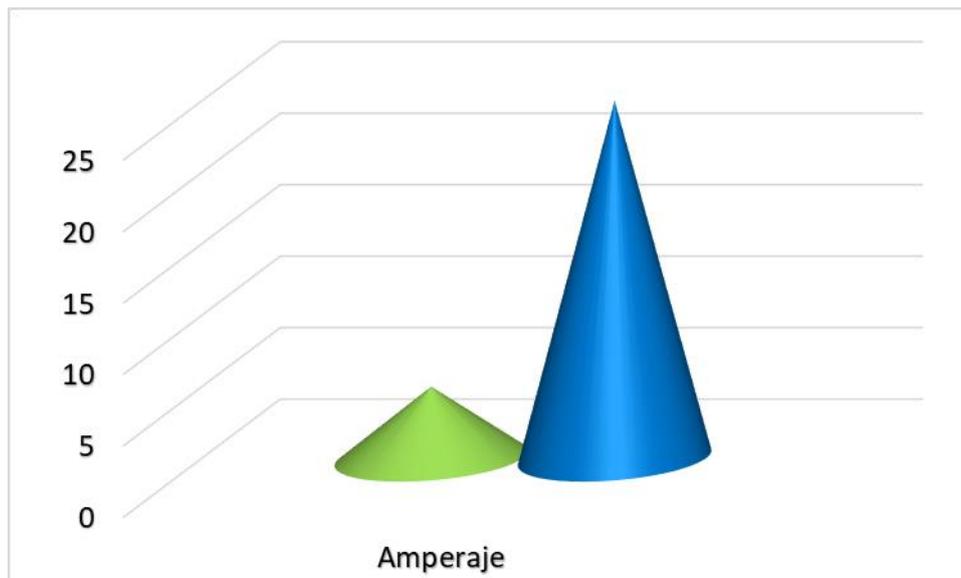


Figura 206: Intensidad de corriente eléctrica.

Fuente: Elaboración propia.

#### Interpretación

En el sistema de electrocoagulación Arango y Garcés, empleo una intensidad de corriente eléctrica igual a 25 A. Mientras en el trabajo de investigación se empleó 5 A. La diferencia es de 20 A.

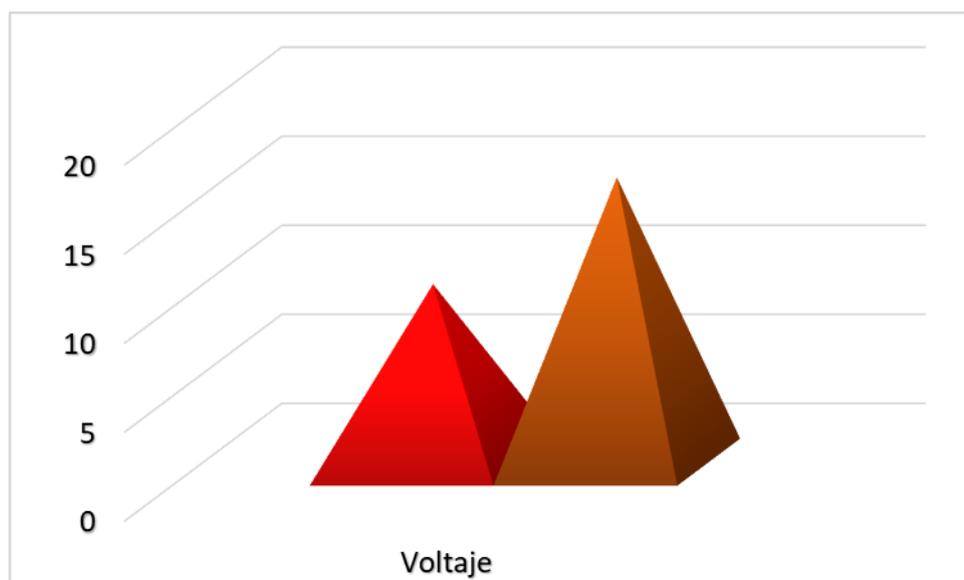


Figura 215: Voltaje suministrada al sistema de electrocoagulación.

Fuente: Autoria propia.

### Interpretación

En el sistema de electrocoagulación Arango y Garcés, empleo un voltaje igual a 16 V.

Mientras en el trabajo de investigación se empleó 10 V. La diferencia es de 6 V.

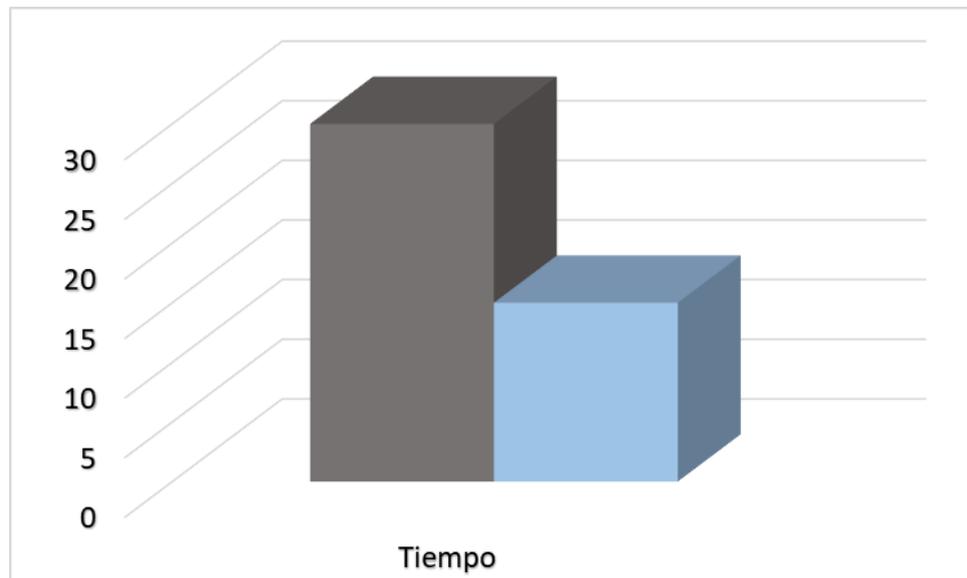


Figura 222: Voltaje suministrada al sistema de electrocoagulación.

Fuente: Elaboración propia.

### Interpretación

Según Arango y Garcés, el tiempo de procesamiento de su sistema de electrocoagulación fue de 15 minutos. Mientras que en el trabajo de investigación se empleó tiempo de procesamiento de 30 minutos.

Tabla 14: Caracterización del residual líquido.

Parámetros	Unidad	Valor
pH	-	12.4
OD	mg/lit	1044
Conductividad	mS/cm	11.76
Turbidez	NTU	421

Nota. Fuente: Magaña et al., 2020.

Tabla 15: Características del agua luego del proceso de electrocoagulación.

Parámetros	Unidad	Valor
OD	mg O <sub>2</sub> /lit	30
pH	...	9.5
Conductividad	mS/cm	10.7
Turbiedad	NTU	19.7

Nota. Fuente: Magaña et al., 2020.

## CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

- Se logró construir una celda de electrocoagulación con capacidad para tratar 3,5lt de aguas turbias, el material fue de vidrio con un espesor de 0,5 cm y los electrodos de aluminio reciclado de envases de bebidas.
- Se determinó que las variables que se deben de considerar para la construcción de una cuba electrolítica son: el tiempo de retención, la intensidad de corriente, el espesor del electrodo y el espacio entre electrodos.
- Las dimensiones de la celda construida fueron: espesor = 0,5 cm; 20 cm de ancho; 15 cm de largo y 20 cm de altura.
- Los electrodos se construyeron con envases de aluminio, y las dimensiones fueron de 10 cm x 10 cm y 1 mm de espesor.

### 5.2 Recomendaciones

- Validar la efectividad de la celda de electrocoagulación construida empleando diferentes tipos de aguas turbias.
- Realizar pruebas de eficiencia de la celda para diferentes tipos de electrodos reciclados.
- Difundir los beneficios que tiene construir las celdas electroquímicas en el tratamiento de aguas residuales.

## CAPITULO VII: FUENTES DE INFORMACIÓN

- Aguilar, C. F., & Palian, A. J. (2020). *Influencia de la densidad de corriente y del tiempo de residencia en la remoción de fosfatos de una solución sintética por electrocoagulación, utilizando electrodos de aluminio a nivel laboratorio*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Química. Huancayo: UNCP. Obtenido de <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
- Arango, R. A., & Garcés, G. L. (15 de 09 de 2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Universidad EAFIT*, 43(147), 56-67. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10784/16714>
- Asociación de Latas de Bebidas. (18 - 19 de 11 de 2015). Latas de bebidas: El envase para todos los canales de venta. . *BCME*. Obtenido de [www.latasdebebidas.org](http://www.latasdebebidas.org)
- Cañizares, P., Martínez, F., Sáez, C., & Rodrigo, M. A. (30 de 10 de 2008). La electrocoagulación, una alternativa al proceso convencional de coagulación de aguas residuales. *AFINIDAD LXVI*, 27-37. Obtenido de <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/276653/364595>
- Chaves, T. J. (2021). *Tratamiento de aguas residuales de la industria cosmética mediante electrocoagulación*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería. Bogotá: UNC. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/81130>
- Domínguez et al, M. A. (30 de 08 de 2011). Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la Electrocoagulación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 0(2), 257-271. Obtenido de [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-27382011000200010](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382011000200010)

Gómez et al, B. S., E., S., & M., V. (01-03 de 2002). Análisis electroquímico. *Revista de Diagnóstico Biológico*, 51(1), 18-27. Obtenido de [http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-79732002000100005&lng=es](http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-79732002000100005&lng=es).

Grupo Envases. (19 de 08 de 2022). *ENVASES*. Obtenido de <https://www.envases.mx/es/>

Hedeş et al, A., & Tudoran, C. A. (23-26 de 10 de 2019). Experimental Research on Electrocoagulation for Wastewater Treatment. 1-5. doi:10.1109/PEE.2019.8923303

Lagos et al, R. (9 de 02 de 2016). Experimentos integrados: utilización de sensores en plantas de la galvanotecnia. *EDUCACIÓN QUÍMICA*, 27(4), 264-268. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.eq.2016.04.002>

Magaña, I. L., Rojas, V. A., González, D. Y., & Ojeda, A. E. (01-04 de 2020). Remoción de contaminantes del residual lácteo por electrocoagulación con electrodos de aluminio. *Tecnología Química*, 40(1), 17-34. Obtenido de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852020000100017&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852020000100017&lng=es&tlng=es).

Muñoz, E. M., Cortés, B. J., & Agudelo, V. R. (01- 06 de 2022). Electrocoagulación con electrodos de aluminio para tratamiento de aguas residuales de curtiembres en Villapinzón, Cundinamarca, Colombia. *MUTIS*, 12(1). doi:<https://doi.org/10.21789/22561498.1783>

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2017). *Aguas residuales el recurso desaprovechado*. ONU-Agua, UNESCO. París: UN WATER. Obtenido de

[https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/9A13A8A4E16D102F05258175006A9AD1/\\$FILE/1\\_\\_15.247647s.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/9A13A8A4E16D102F05258175006A9AD1/$FILE/1__15.247647s.pdf)

Prieto, G. F., Callejas, H. J., Reyes, C. V., Marmolejo, S. Y., & Prieto, M. J. (06 de 2014).

Electrodisolución de electrodos de aluminio durante la electrocoagulación de un lactosuero ácido. *DYNA*, 81(187), 129 - 136.  
doi:<http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v81n187.40757>

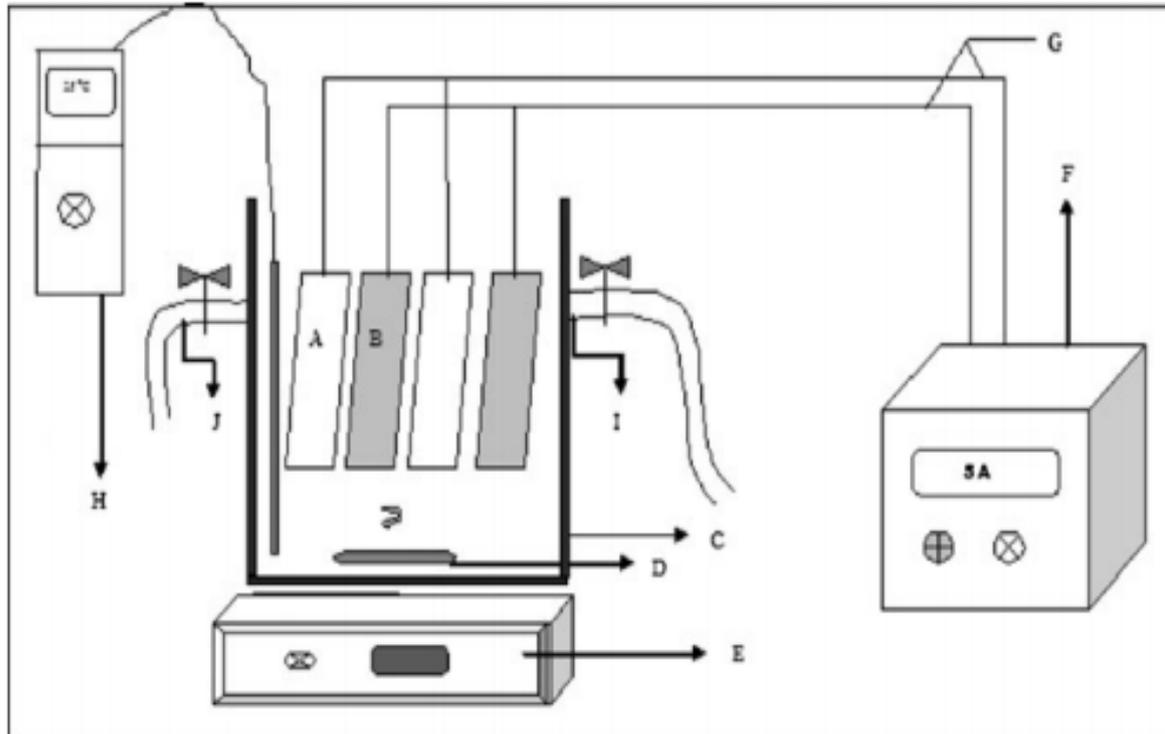
Ruiz, O. O. (2021). *Reúso de latas de aluminio para la remoción de DQO en una celda de electrocoagulación en la ciudad de Huancavelica*. Universidad Nacional de Huancavelica, Facultad de Ciencias de Ingeniería. Huancavelica: UNH. Obtenido de <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/4415>

Sierra, R. C. (2011). *Calidad del agua - Evaluación y diagnóstico* (Primera ed.). (E. L. López, Ed.) Medellín, Colombia: Ediciones de la U. Recuperado el 19 de 08 de 2022

Zamudio, M. A., Pérez, R. M., & Esquivel, E. K. (23 de 06 de 2016). Recycled aluminum modified with MWCNT for structural spatial truss applications. *CONIIN*, 1 - 5.  
doi:10.1109/CONIIN.2016.7498118.

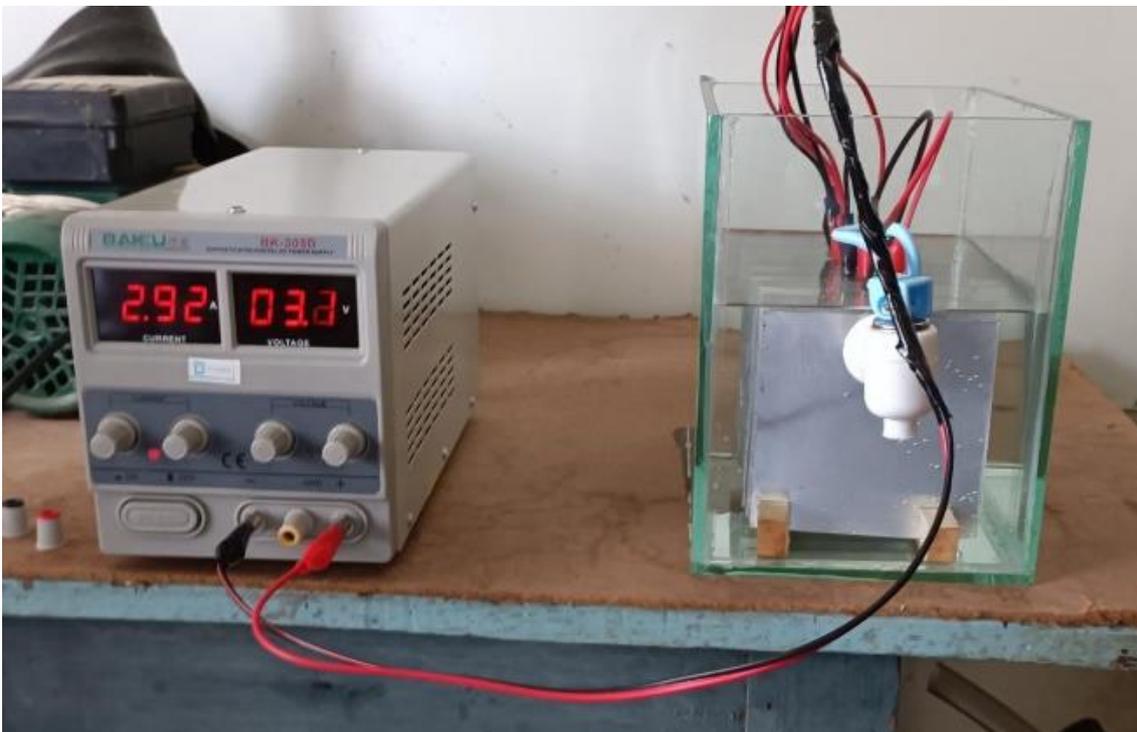
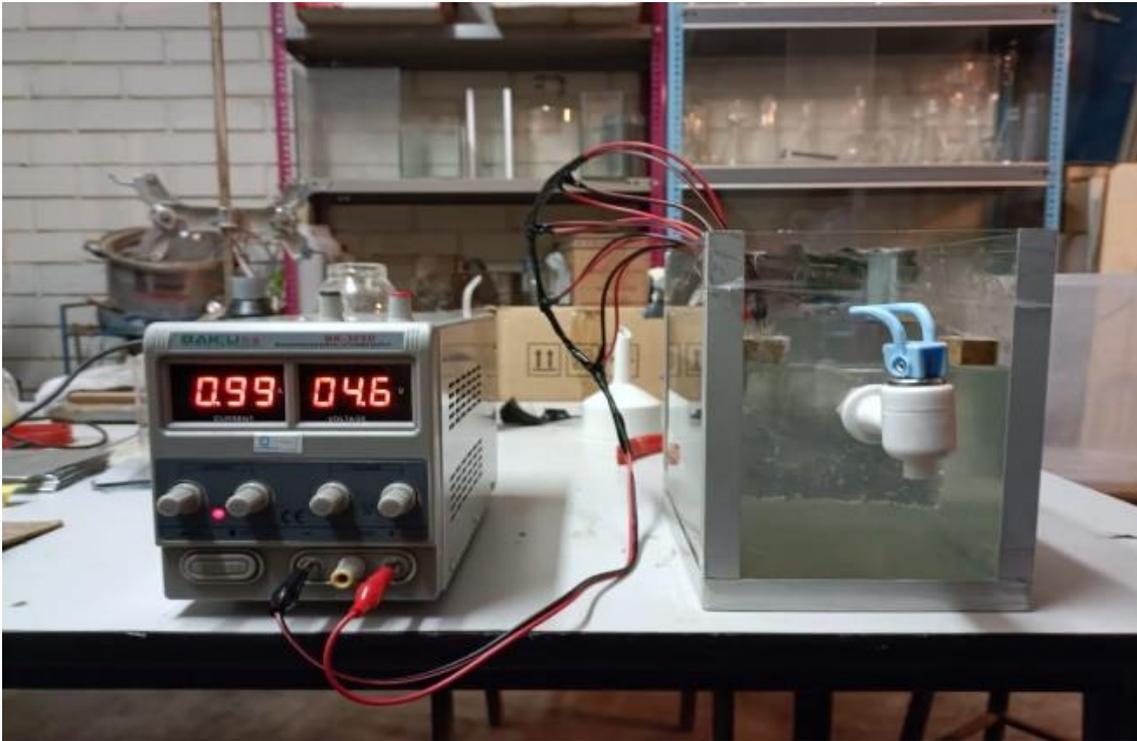
# ANEXOS

## ANEXO 1. Montaje de un sistema de electrocoagulación



- A. Ánodo,
- B. cátodo,
- C. reactor electroquímico,
- D. agitador,
- E. agitador magnético,
- F. suministro de CC,
- G. cable,
- H. termómetro digital,
- I. entrada de agua,
- J. salida de agua

## ANEXOS 2. Fotografias





**ANEXO 3: Instrumentos de análisis****Turbidímetro****Medidor de OD (Oxígeno Disuelto)**



**Medidor multiparámetro**