



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

“PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA PLANTA DE IONIZACIÓN
ELECTROQUÍMICA PARA TRATAMIENTO DE AGUAS GRISES CON
BASE EN LOS PARÁMETROS DE LA NOM-001-SEMARNAT 2021”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A:

MARTÍNEZ CASTRO OMAR

DIRECTOR: Dra. María Guadalupe Salinas Juárez

ASESOR:I.Q. Enedino Varela Montellano

ASESOR: Dr. Edtson Emilio Herrera Valencia



CIUDAD DE MÉXICO, 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Que el conocimiento y el amor sean siempre islas de certeza sobre mares de incertidumbre.

*Oh, Inmortal Poseidón el del furioso tridente, a ti me encomiendo en esta difícil proeza
propicia que este velero llegue a buen puerto, permíteme llevar a cabo los designios*

de Afrodita nacida de las olas, oh, Calíope mi augusta entre las musas

haz florecer mi jardín, guía mi vida...

Dedicatoria

El objetivo principal de este trabajo siempre fue brindarle amor y honor a las personas que cimentaron lo que soy como persona y en este espacio me extiendo para ustedes.

Estas palabras son para mi madre.

Para ti que siempre que estoy solo tú me acoges, mi fiel compañía, me hablas sincera y me esperas cuando acaba el día. Mi guía, mi faro de Alejandría, si me ves perdido, te miro y elimino mis tristezas de un suspiro. Distes sentido a mi existencia y de ti heredado tu desobediencia, tu sola presencia merece mi reverencia, tú me diste un don y fuiste mi espada, siempre marcada con amor para que nada me faltara.

De la nada me abrazas, me exiges, me prohíbes y amenazas, tan entera y tan auténtica; tu nunca te disfrazas, tu mi firme escudo en la batalla, a quien acudo si otros fallan. Gracias porque siempre me exiges crear, lograr, soñar, me curas y me enseñaste a hablar si las calles están mudas

Me alegras, me invades y alejas las tinieblas, cuando caigo me resucitas siempre, nunca me mientes y eres el recipiente donde mis lágrimas se vierten. Gracias

Maniguis, eres todo lo que tengo y te amo; este trabajo es para ti.

A la memoria de mi padre Noé Camacho Fuentes; De quien aprendí a amar la tierra, trabajar el campo, la prudencia y a ser un buen hombre. Donde quiera que estes papá quiero que sepas que estoy orgulloso ser tu hijo, que estoy agradecido con el amor, el tiempo que me diste y a tus manos trabajadoras que a mi madre y a mi nos dieron el sustento y a las que también le debo mi título de ingeniero.

A la memoria de Soledad Castro Carranza: Mi abuela, que con su amor, sabiduría y particular forma de ser contribuyó a la formación de mi carácter. Abuelita tu vida y tu historia para mí son una noria. Tu recuerdo y tu legado vivirán en mi para siempre.

A la memoria de Ma del Pilar Ramírez Peralta. Por enseñarme que el no creer en dios y el ateísmo es una forma de no amarme, que la vida es aceptar lo que nos pasa y vivir con fé en dios y en nosotros mismos.

A la memoria de Moisés Rodríguez Olalde. Porque el amor y las buenas acciones para los que queremos trascienden y permanecen en la vida incluso después de la muerte.

Agradecimientos

Cerrando el círculo...

Gracias a mi madre por su paciencia y su comprensión siempre a mi lado en un camino muy duro, donde su amor y palabras de aliento fueron ese combustible durante toda mi vida, por permitirme cumplir uno de mis más grandes sueños, pero sin escribir una sola palabra, por comprender esto y mucho más gracias, ahora que lo termine se lo dedico porque esto es solo suyo.

A mis tíos y tías por todo el cariño que me han dado, nunca podré terminar de agradecerles.

A mis primos y primas gracias por acompañarme y apoyarme en los momentos más duros de mi vida, por el cariño, protección y consejos que he recibido de cada uno de ustedes, gracias por enseñarme tantas cosas y por ser los hermanos que nunca tuve.

A mis sobrinos por el cariño que me brindan. Prometo estar ahí siempre para ustedes.

Gracias a todo el equipo de Azteca Ingeniería, gracias a la invaluable contribución del Ingeniero Luna, Ingeniero Varela Montellano, Ingeniero Villegas por todo el cariño que le han puesto a esto. Gracias por la oportunidad que me dieron de poder desarrollarme como profesionista y contribuir de manera considerable a mi formación como Ingeniero Químico. Gracias por la paciencia, enseñanzas, consejos y los buenos momentos “las risas nunca faltaron” en verdad gracias.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, que desde la preparatoria me brindo una inmensa cantidad de conocimiento que fuera de lo profesional, me ha cultivado y enriquecido como ser humano.

Gracias a la profesora Ma. Guadalupe Salinas, por recibirme y creer en este trabajo.

Gracias a mis profesores Alfonso Luna, Encarnación Jiménez y Eduardo Giles que a base de mano dura me enseñaron a no rendirme y hacerme dar cuenta que verdaderamente si estaba hecho para esta carrera.

A mis amigos “compañeros de tertulios” que conocí en la facultad: Dago, Pechamen, Mike G, Wallace, Pacheco, Jarocho, Erick, Avril y Karen, sigo sin creer que, de tanta mugre, surgieron amistades invaluable. Sin olvidarme de mis amigos preparatorianos: Juan, Kevin, Manuel, Misael, Ricardo, Aurelio y Guillermo. Que su amistad y vivencias fueron uno de los regalos que me pudo brindar la vida.

Contenido

Nomenclatura y simbología.....	10
Glosario	11
Resumen.....	15
1. Introducción.....	16
Objetivo general.....	17
2. Marco Teórico	19
2.1 Normativa	19
3. Antecedentes	23
3.1 Generalidades de la ionización electroquímica.....	24
3.1.1 Conductividad del agua relacionada con la ley de Ohm	24
3.1.2 Electroquímica	24
3.1.3 Ánodo y cátodo en ionización electroquímica	24
3.1.4 Funcionamiento de un reactor electrolítico.....	25
3.2 Ionización electroquímica	25
3.2.1 Descripción del fenómeno de ionización electroquímica	26
3.2.2 Factores Involucrados en la Ionización electroquímica	26
3.2.3 Reacciones químicas dentro del reactor electrolítico empleado	27
3.3 Aguas Grises	28
3.4 Características de las aguas grises.....	28
3.5 Plantas de tratamiento de aguas residuales existentes	29
4. Diseño y construcción del reactor electroquímico	30
4.1 Diseño de reactor de ionización electroquímica	30
4.2 Selección de material de los electrodos	31
4.3 Dimensionamiento	34
4.3.1 Cálculo de tiempo de residencia hidráulico de reactores	40
4.3.2 Configuraciones eléctricas en las que los reactores pueden operar	41
5. Pruebas de ionización electroquímica	44
5.1 Experimentación.....	44
5.1.1 Parámetros de caracterización de influente	44
5.1.2 Pruebas de ionización electroquímica	46
6. Resultados y análisis de resultados experimentales	50
6.1 Equipos de análisis de aguas residuales utilizados.....	50

6.2	Resultados y análisis del proceso de ionización electroquímica.....	51
6.3	Potencial de hidrógeno pH.....	52
6.4	Color Aparente UPC.....	53
6.5	Conductividad eléctrica del agua	55
6.6	Sólidos disueltos totales (SDT)	56
6.7	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	58
7.	Diseño conceptual de planta de tratamiento de aguas grises	60
7.1	Bases de diseño y control	61
7.2	Descripción de proceso.....	61
7.3	Lista de equipos de proceso.....	63
7.4	Flujo de operación	64
7.4.1	Cribado Cr-01.....	64
7.4.2	Desarenado DA-01	66
7.4.3	Tanque de igualación Ti-01 y Ti-02	67
7.4.4	Clarificador Cla-01.....	68
7.4.5	Bomba centrífuga BC-01 y BC-02.....	68
7.4.6	Filtro de lecho profundo FLP-01 (Filtro multimedia)	69
7.4.7	Recirculación y disposición de residuos	70
7.4.8	Tanque de recirculación TR-01	70
7.4.9	Decantador "Dec-01"	70
7.4.10	Filtro prensa "Fp-01"	71
7.5	Filosofía de operación.....	73
7.5.1	Arranque.....	73
7.5.2	Operación Normal.....	73
7.5.3	Paro normal	75
7.5.4	Paro de emergencia	75
7.6	Diagrama de tubería e instrumentación DTI.....	76
7.6.1	Lista de instrumentos.....	76
7.6.2	Diámetro de tuberías	77
8.	Discusión de resultados	78
8.1	Discusión de resultados de la experimentación.....	79
9.	Análisis de la propuesta de diseño	82
10.	Beneficios sociales y ambientales	85

10.1	Beneficios sociales.....	85
10.2	Beneficios ambientales.....	85
10.3	Beneficios económicos	86
11.	Conclusiones y perspectivas a futuro.....	87
13.	Bibliografía	99

Índice de figuras

Figura 1.	Representacion gráfica de mecanismo de acción de ionización electroquímica.(Mollah et al, 2004).	25
Figura 2.	Remoción de DQO en reactor en lote con electrodos de hierro a diferentes densidades de corriente. (Desarrollo propio) 2022	31
Figura 3.	Tipo de contaminantes removido según material utilizado en electrodos en pruebas tipo <i>Batch</i> y continuo empleando ionización electroquímica.(Mohammad,2009).	32
Figura 4.	Geometría de reactor en lote Arango Ruíz & Garcés Giraldo. 2007	35
Figura 5.	: Representacion gráfica de prisma rectangular	36
Figura 6.	Geometría de reactores de acrílico para electrodos de hierro 2023.Elaboración propia	37
Figura 7.	: Geometría de reactores de acrílico para electrodos de aluminio .Elaboración propia ..	40
Figura 8.	Diagrama de arreglo de electrodos monopolares en paralelo 2023 (elaboración propia)	42
Figura 9.	Diagrama de arreglo de electrodos monopolares conectados en serie (elaboración propia)	42
Figura 10.	Figura : Muestra de aguas grises.	44
Figura 11.	Tanque de almacenamiento de aguas grises.	45
Figura 12.	Pruebas hidráulicas de Reactores de ionización electroquímica	46
Figura 13.	Reactor con electrodos de hierro.	47
Figura 14.	Reactor con electrodos de aluminio	47
Figura 15.	Formación de flóculos en reactor de Aluminio	49
Figura 16.	Influyente (A), Efluente del reactor con electrodos de hierro (B), Efluente del reactor con electrodos de Aluminio (C).	49
Figura 17.	Influyente (A), Efluente del reactor con electrodos de hierro (B), Efluente del reactor con electrodos de aluminio (C).	49
Figura 18.	Comportamiento del ph en pruebas de ionización electroquímica. Corridas de febrero y marzo de 2023.Elaboración propia	53
Figura 19.	Reducción de turbidez con respecto a voltaje aplicado en pruebas de ionizacion electroquimica ,febrero y marzo 2023. Elaboración propia	54
Figura 20.	Eficiencia de remoción de color UPC febrero y marzo 2023. Elaboración propia.	55
Figura 21.	Conductividad del eléctrica agua en pruebas de ionización electroquímica febrero y marzo 2023. Elaboración propia	56
Figura 22.	Remoción de sólidos disueltos totales en pruebas de ionización electroquimica en febrero y marzo 2023. Elaboración propia	57
Figura 23.	Eliminación de sólidos disueltos totales en pruebas de ionizacion electroquimica en febrero y marzo de 2023. Elaboración propia	57
Figura 24.	Remoción de materia orgánica en pruebas de ionización electroquímica en febrero y marzo 2023.Elaboración propia	58
Figura 25.	Demanda química de oxígeno en pruebas de ionización electroquímica febrero y marzo 2023.Elaboracion propia	59
Figura 26.	Diagrama de bloques para Tren de tratamiento de aguas grises mediante ionización electroquímica. Elaboración propia 2023.	60

Figura 27.	Diagrama de flujo de proceso de planta de ionización electroquímica. Elaboración propia 2023	63
Figura 28.	Cribado y configuración de tren de rejillas de influente. Elaboración propia 2023.	66
Figura 29.	Desarenador horizontal (corte frontal).Elaboración propia.....	67
Figura 30.	Tanque de igualación Ti-01 y Ti-02. Elaboracion propia.	67
Figura 31.	Clarificador Cla-01. Elaboración propia.....	68
Figura 32.	Bomba centrífuga “BC-01 y “BC-02” .Elaboración propia.	69
Figura 33.	Filtro de lecho profundo “FC-01”. Elaboración propia.....	69
Figura 34.	Tanque de recirculación “TR-01” .Elaboración propia	70
Figura 35.	Decantador “Dec-01”. Elaboración propia.	71
Figura 36.	Filtro prensa “Fp-01”. Elaboración propia.....	72
Figura 37.	Diagrama de Tubería e instrumentación. Elaboración propia 2023.	76
Figura 38.	Diámetro de tuberías y caudal máximo de operación. Biopur habitat 2021.	77
Figura 39.	Vista del prototipo en prueba en campo.2023.....	95
Figura 40.	Efluente de agua residual comercial.2023	95

Índice de tablas

Tabla 1.	Parámetros permisibles para descarga de aguas residuales a cuerpos receptores de agua propiedad de la nación. Diario Oficial de la Nación (2021).....	21
Tabla 2.	Revisión bibliográfica de estudios relacionados a la electrocoagulación (Piña Soberanis et al.,2011)parte 1.	33
Tabla 3.	Revisión bibliográfica de estudios relacionados a la electrocoagulación (Piña Soberanis et al.,2011) Parte 2	34
Tabla 4.	: Calculo de Tiempo de residencia hidráulica de reactores.....	41
Tabla 5.	Caracterización de influente de aguas grises feb 2023.(elaboración propia)	45
Tabla 6.	Caracterización de influente de aguas grises marzo 2023.(elaboración propia)	45
Tabla 7.	Corrida en continuo de Reactor de Hierro Febrero 2023. Elaboración propia.	47
Tabla 8.	Corrida en continuo de Reactor de Aluminio Febrero 2023. Elaboración propia.	48
Tabla 9.	Corrida en continuo de Reactor de Hierro Marzo 2023.Elaboración propia.	48
Tabla 10.	Corrida en continuo de Reactor de Aluminio Marzo 2023.Elaboración propia.	48
Tabla 11.	Listado y descripción de los equipos utilizados en análisis de aguas residuales 2023 .	50
Tabla 12.	Caracterización de influente de agua gris Febrero-Marzo de 2023.Elaboracion propia.	52
Tabla 13.	Listado de equipos de proceso. Elaboración propia	63
Tabla 14.	Corrientes de proceso. Elaboración propia.....	64
Tabla 15.	Catálogo de Filtros prensa. TORO Waste Water Equipment 2020.	72
Tabla 16.	Ventajas y desventajas de la implementación de la ionización electroquímica 2023. Elaboración propia.....	78
Tabla 17.	Caracterización de efluente de agua residual (aguas residuales comerciales).2023 ...	94
Tabla 18.	Caracterización de efluente de agua residual comercial No 1.2023.	95
Tabla 19.	Caracterización de efluente de agua residual comercial No 2.2023	96
Tabla 20.	Caracterización de efluente de agua residual comercial No 3. 2023.	96
Tabla 21.	Corrida de planta prototipo en aguas residuales comerciales.2023.	97

Anexos

Anexo I.	Diagramas de circuitos en serie y paralelo , corrida financiera y prueba con aguas negras comerciales.	89
	Diagrama de circuito en serie (elaboración propia)	89
	Diagrama de circuito en paralelo. (Elaboración propia).	89
Anexo II.	Normas Oficiales Mexicanas para caracterización de efluentes de agua residuales. ..	90
Anexo III.	Tabla de Parámetros de caracterización de aguas residuales NOM-001-SEMARNAT-1996.	93
Anexo IV.	Limites permisibles para Metales y Cianuros. NOM-001-SEMARNAT-2021.	94
Anexo V.	Pruebas de ionización electroquímica en aguas residuales comerciales.....	94
Anexo VI.	Análisis energético de planta prototipo de aguas residuales por la tecnología de ionización electroquímica.	97

Nomenclatura y simbología

°C: Grado Celsius

μS: Micro siemens

CE: Conductividad eléctrica

cm: Centímetro

DBO: Demanda biológica de oxígeno

DFP: Diagrama de flujo de proceso

DQO: Demanda química de oxígeno

DTI: Diagrama de tubería instrumentación

i: Amperaje

j: Densidad de corriente

L: Litro

pH: Potencial de hidrógeno

PLC: Control lógico programable

Q: Caudal

RENAMECA: Red Nacional de Medición de Calidad del Agua

T: Temperatura

SDT: Sólidos disueltos totales

TRH: Tiempo de residencia hidráulico

UPC: Unidades platino cobalto

V: Volumen

Volt: Voltio

Ω: Ohm

Glosario

Aguas grises: Se les denomina aguas grises a las aguas residuales provenientes de regaderas, lavabos y lavadoras.

Amperaje: La intensidad de corriente que pasa entre dos conductores.

Ánodo: Electrodo de polaridad positiva.

Cátodo: Electrodo de polaridad negativa.

Caudal: Volumen de agua que atraviesa una superficie por unidad de tiempo.

Centímetro: Unidad de medida en sistema internacional, que representa la centésima parte de un metro.

Circuito en serie: Los circuitos eléctricos en serie son componentes eléctricos que se conectan de extremo a extremo para formar una sola ruta a través de la cual la corriente fluye por el circuito. Como se muestra en el 0.

Circuito en paralelo: Son componentes eléctricos en los cuales las terminales de entrada para cada componente están conectadas entre si, lo mismo ocurre entre los terminales de salida, creando múltiples caminos para que la corriente fluya de un extremo de la batería al otro. Como se muestra en la siguiente el 0.

Color aparente: Color Aparente en Unidades Platino Cobalto. El término de “color” se usa para referirse al color de agua de la que se ha retirado la turbidez. El termino de color aparente no solo incluye el color debido a sustancias en solución, sino también al color en suspensión.

El color aparente es un parámetro que mide los compuestos disueltos en el agua, como los sólidos disueltos y suspendidos que causan un color aparente. El color se mide en unidades de platino cobalto. (HANNA INSTRUMENTS, 2023).

Conductividad eléctrica del agua: La conductividad del agua es una propiedad fisicoquímica, la cual está totalmente relacionada con la cantidad de iones disueltos en ella y que son capaces de conducir la corriente eléctrica (electrolito) que, en contraste, mientras mayor sea la cantidad de iones o electrolitos disueltos en el agua, esta conductividad eléctrica será mayor.

Para que la electricidad se genere dentro de los electrolitos se necesita inducir energía por medio de una batería que suministre corriente al sistema, de este modo se creará un sistema llamado celda electrolítica.

Corriente: Se define como la cantidad de corriente o flujo de electrones que transitan en un conductor su unidad de medida son los (Amperios). Este es directamente proporcional al voltaje, lo que quiere decir que el voltaje crece o decrece, la corriente lo hace en una igual magnitud.

Demanda Biológica de Oxígeno: Es un parámetro de medición y caracterización de aguas residuales en el que se cuantifica la demanda de oxígeno de que consumen los microorganismos aerobios y anaerobios durante la degradación de las sustancias orgánicas de las muestras de agua residual. Es un proceso biológico, por lo tanto, se requiere de mucho cuidado y depende de la cantidad de microorganismos presentes en la muestra a degradar.

Se define como la cantidad de oxígeno consumido por microorganismos para degradar materia orgánica, las cuales precisan de dicho elemento para completar la descomposición.

Demanda Química de Oxígeno: La Demanda química de oxígeno es un parámetro que mide la demanda de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica presente en una muestra por medios químicos y convertirla en CO₂ (dióxido de carbono) y H₂O (agua). Cuanto mayor es la DQO, mayor cantidad de contaminantes presentes en el agua. Este proceso de medición y parametrización es de los más eficientes debido a que considera especies químicas y no biológicas, orgánicas e inorgánicas.

Densidad de corriente: Se refiere a la corriente que circula por un conductor por unidad de área. Se define como un vector en cada punto de un conductor cuyo módulo es la intensidad de corriente por unidad de superficie. Su unidad es el amperio por metro cuadrado.

Electrodo: Se define como un conductor eléctrico que atrae electrones a un medio (electrolito, semiconductores, gases, elementos no metálicos, etc.). El electrodo es el elemento crucial de una célula electroquímica que está en contacto con el electrolito se llama electrodo y este actúa como el contacto en la cual la corriente entra y sale del electrolito. Es el medio por el cual se produce una reacción de reducción (redox) entre el metal y la solución.

Electrolito: Se define como la sustancia o cuerpo en el que se lleva a cabo la electrólisis, se le considera como el medio de intercambio entre el ánodo y el cátodo.

Litro: Unidad de volumen para los líquidos.

Ley de Ohm: Postulada por el físico alemán *Georg Simon Ohm* y es una de las leyes fundamentales de la electrodinámica, estrechamente relacionada con los valores de las unidades básicas presentes en cualquier circuito eléctrico como lo son: Tensión (voltaje) , intensidad de corriente en amperes (A) y resistencia de la carga o consumidor conectado al circuito en ohm. La ley se enuncia como: EL flujo de corriente en amperios que circula en un circuito eléctrico cerrado, es directamente proporcional a la tensión o voltaje aplicado, e inversamente proporcional a la resistencia en ohm de la carga conectada.

$$I = \frac{E}{R} = \text{Amp} = \frac{\text{volts}}{\text{ohm}}$$

Micro Siemens: Es la unidad de conductancia o conductividad eléctrica en el Sistema internacional.

NOM-001-SEMARNAT-1996: Norma Oficial Mexicana expedida por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en el año 1996 que regulaba los criterios de caracterización de efluentes de agua residuales para la disposición de este a cuerpos de agua propiedad de la nación.

NOM-001-SEMARNAT-2021: Norma Oficial Mexicana expedida por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en el año 2021 que regula los criterios de caracterización de efluentes de agua residuales para la disposición de este en cuerpos de agua propiedad de la nación. La norma entró en vigor en abril de 2023, en virtud de sustituir la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Pasivación: Es la formación de una película o membrana sobre la superficie de un material metálico la cual aísla los electrodos del electrolito.

Sólidos disueltos totales: Los sólidos totales disueltos (SDT) comprenden a cualquier mineral, sal, metal, moléculas, átomos, cationes o aniones disueltos en el agua. Los (SDT) comprenden las sales inorgánicas de calcio, magnesio, potasio, sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos disueltos en el agua.

Los altos niveles de estos sólidos en las aguas pueden afectar la turbidez de esta, aumentar la temperatura del agua. Provocando que aumente la temperatura del agua con mayor facilidad debido a que estas partículas suspendidas son capaces de captar y almacenar el calor, lo que puede proliferar el cultivo de virus y colonias de bacterias en el agua y malos olores, lo que afecta negativamente en la disposición y tratamiento de las aguas residuales. (Williams. K,2023)

Temperatura: Es una unidad de medición y parametrización de una magnitud física que indica la energía interna de un cuerpo, de un objeto, del medio ambiente en general, medida por un termómetro.

Tiempo de residencia hidráulica: El tiempo promedio en el ingreso de agua y el tiempo en el que se demora en salir. Esto se refiere a la relación existente entre el volumen de un cuerpo de agua (lagos, pozos, tanques, etc.) y el caudal de entrada y el de salida.

Ohm: Unidad de resistencia eléctrica del Sistema internacional de unidades, de símbolo Ω , que equivale a la resistencia eléctrica que hay entre dos puntos al aplicarse una diferencial de potencial eléctrico.

Potencial de Hidrógeno: Se define como la concentración de iones o cationes de hidrógeno presentes en una sustancia y se calcula de con la ecuación $(\text{pH}=-\log [\text{aH}^+])$.

Es la medida para determinar el grado de alcalinidad o acidez en cualquier disolución en la que se determina la concentración de los iones de hidrógeno.

Normalmente se mide a partir de una escala de 1 a 14 donde 1 es el valor más ácido y el 14 es el valor más alcalino y el valor neutro es el de 7.

Es un parámetro de medición de la mayoría de los procesos industriales, procesamiento de alimentos, agricultura, tratamiento de aguas, medicamentos, entre otras industrias. (HANNA Instruments, 2023).

Resistencia: Es la dificultad o facilidad con la que un material permite el paso de electrones al paso de una corriente eléctrica y esta se mide en ohmios Ω

Voltio: Unidad de potencial eléctrico y de fuerza electromotriz.

Voltaje: El voltaje es la cantidad de energía potencial entre dos puntos de un circuito en el que un punto tiene más carga que otro y esa diferencia se llama

Voltaje. El voltaje es la cantidad de energía potencial entre dos puntos de un circuito en el que un punto tiene más carga que otro y esa diferencia se llama Voltaje. Es la energía potencial que imparte un Joule de energía por Coulomb de carga que pasa en él. Es también llamado la diferencia del potencial eléctrico o tensión eléctrica, que es el trabajo por unidad de carga eléctrica en el que se ejerce sobre un campo eléctrico para moverla entre dos puntos determinados.

Cuando se unen dos puntos que presentan una diferencia de potencial eléctrico a través de un material conductor, presenta un movimiento o flujo de electrones (corriente eléctrica) que fluye desde el punto de mayor a menor potencial.

Volumen: Magnitud de un objeto en sus tres dimensiones.

Resumen

El objetivo principal de este trabajo de investigación es el diseño conceptual y construcción de un prototipo para una planta de ionización electroquímica, cuyo objetivo es tratar aguas residuales, específicamente, aguas grises. El propósito de este tratamiento es remover la mayoría de los contaminantes presentes, apegándose en lo posible a los requerimientos planteados en la Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación “NOM-001-SEMARNAT-2021”. El prototipo desarrollado aplica la tecnología de ionización electroquímica, utilizando electrodos de hierro y aluminio y variando los parámetros de voltaje y amperaje.

El trabajo se llevó a cabo en las siguientes etapas:

- Planeación de los experimentos.
- Caracterización de los parámetros del influente a tratar (sólidos disueltos, demanda química de oxígeno, color aparente, pH y conductividad).
- Pruebas experimentales de los reactores de hierro y aluminio.
- Trabajo de gabinete.

Una vez delimitados los parámetros de experimentación y de diseño, se diseñaron dos reactores continuos con la capacidad de tratar un flujo de agua residual gris de 0.7, 1 y 1.5 L/min, con los electrodos de hierro y aluminio. Para la experimentación se trabajó con diferentes valores de voltaje aplicado (entre 4.5 y 11 volts).

Se realizó el análisis de resultados con respecto a la remoción de los contaminantes presentes en el agua por medio de la demandad química de oxígeno. Se obtuvieron remociones entre 70% y 80% en las muestras de agua gris para materia orgánica, considerando un 100% de 300 mg/L, lo que presenta resultados que cumplen con el planteamiento de esta propuesta tecnológica. El prototipo de tratamiento de aguas residuales aquí planteado cumple con los parámetros medidos que se incluyen en la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021.

1. Introducción

La sociedad en general enfrenta un grave problema ligado al deterioro de uno de los recursos naturales más importantes: el agua, que hasta hace un “relativo” tiempo se le consideraba un recurso renovable. Las fuentes de aprovechamiento y captación del agua han sufrido un deterioro constante que representa el descenso considerable de la disponibilidad y accesibilidad de este recurso.

La demanda de agua ha incrementado en todo el mundo en un 1 % cada año desde la década de los 80s. Los factores causantes son el crecimiento de la población, el desarrollo económico y los hábitos de consumo. Se espera que la demanda de agua siga aumentando a un ritmo constante por lo menos hasta el año 2050, lo que representa un aumento del 20 al 30% por encima del uso de agua actual, principalmente acaparando el sector industrial y doméstico. (UN-Water,2019).

Hoy en día más de dos mil millones de personas experimentan carencia de este recurso y más de cuatro mil millones de personas experimentan escasez de agua durante al menos dos meses al año. Esta demanda, seguirá aumentando en la medida en la que crezca la población, aunado a los efectos del cambio climático (UN-Water,2019).

La problemática de la contaminación del agua en México y la cada vez más escasa disponibilidad de este recurso, aunado a la creciente demanda del mismo para las actividades económicas del país va en aumento y desde la óptica del manejo sustentable de los recursos naturales, es imperioso el manejo adecuado y reúso del agua debido a que concierne actuar de manera consistente y presentar alternativas tecnológicas para mejorar el tratamiento y reúso del agua. Sin embargo, es indispensable que las propuestas satisfagan aspectos como son: un diseño específico para el tratamiento, tener ventajas ambientales, alta efectividad con respecto a las tecnologías ya existentes, un bajo costo de producción y un bajo costo de operación.

De acuerdo con la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en su artículo 4° establece que toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. Por lo anterior, se generará responsabilidad para quien provoque daño y deterioro ambiental, en términos de lo dispuesto por la ley. Así mismo, la Constitución establece que toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal, doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso, uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines.

Las políticas ambientales enfocadas a la preservación y tratamiento de los recursos hídricos de México se han visto limitadas debido al incremento de la población, la

contaminación de los lagos, ríos y mantos acuíferos. Las políticas públicas para el manejo de los contaminantes del agua han planteado parámetros poco eficientes para la disposición de este recurso. Así mismo, el manejo de prácticas poco sustentables en las industrias para el reúso de sus recursos hídricos se ha visto beneficiado por las “políticas públicas a modo”, promoviendo que no se tome responsabilidad ambiental para la disposición de las aguas residuales.

Se omiten, también en la industria, prácticas sustentables para el diseño de sus procesos y disposición de residuos contaminantes, además de que ambientalmente, se carecía de índices de manejo y reúso de recursos hídricos y el costo ambiental, aunado al alto precio de las nuevas tecnologías para tratamiento de aguas, las volvía poco rentables.

Para promover el cuidado del medioambiente y mejorar la calidad de las aguas residuales y su disposición a lagos, mares, ríos, y cuerpos de agua, en general, el gobierno de México ha promulgado la nueva Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT 2021 que enuncia cambios significativos en la parametrización de las descargas de aguas residuales. Cuya vigencia entró en vigor en el mes de abril de 2023.

En el presente proyecto, se propone el desarrollo de una tecnología para el tratamiento de aguas residuales e industriales. Esta tecnología busca cumplir los nuevos lineamientos de caracterización del agua en términos de su contenido de materia orgánica medida como la demanda química de oxígeno (en adelante, DQO) de acuerdo con lo indicado en la “Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT 2021”. El desarrollo de la tecnología de este proyecto está basado principalmente en el proceso de ionización electroquímica, más los procesos de tratamiento complementarios. La finalidad de la tecnología es tratar el agua procedente de las actividades humanas para reutilizarla y presentar una alternativa a la problemática emergente derivada de la nueva normativa.

Objetivos

Objetivo general

Proponer un sistema de tratamiento de aguas residuales grises que cumpla con lo estipulado en la Norma Oficial Mexicana NOM-001- SEMARNAT 2021 para remoción de contaminantes medidos como DQO, por medio de una tecnología basada en ionización electroquímica para el tratamiento de aguas residuales.

Objetivos Particulares

- Proponer una tecnología mediante un reactor electro-ionización para el tratamiento de aguas residuales, utilizando electrodos de hierro y aluminio.

- Proponer el tren de tratamiento que incluya al reactor de ionización electroquímica y partiendo de la separación de sólidos.
- Construir un prototipo del reactor de ionización electroquímica.
- Caracterizar el efluente tratado por el reactor de acuerdo con los parámetros de remoción de materia orgánica medida como DQO, pH, color aparente, sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica.
- Analizar la relación de materia orgánica (DQO) con respecto al consumo energético.
- Evaluar la viabilidad del proceso en cuanto a la remoción de materia orgánica medida como DQO.
- Presentar una propuesta de diseño de la planta de tratamiento y su filosofía de operación con base en los resultados obtenidos con el prototipo experimental.
- Discutir los beneficios sociales, ambientales y económicos que este proyecto sustenta.

Hipótesis

Si se trata agua gris, con una concentración de materia orgánica de 300 mg/L, en un reactor de ionización electroquímica con electrodos de hierro y aluminio, entonces se logrará una remoción del 70% de materia orgánica.

Alcances

- El agua a tratar es agua residual gris, fue obtenida de una casa habitación de la zona sur de la Ciudad de México.
- El sistema de tratamiento fue diseñado para tratar aguas residuales grises.
- El reactor experimental se probó para tratar tres flujos: 0.7, 1 y 1.5 L/min
- La caracterización del efluente tratado con base en la NOM-001-SEMARNAT incluye únicamente los parámetros de materia orgánica medida como DQO, sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica, pH y temperatura.

2. Marco Teórico

2.1 Normativa

Considerando lo que establece el artículo cuarto de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, que dispone que toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. Donde el daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque, en términos de lo dispuesto por la ley en esta materia. Asimismo, establece que toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. Esta es una de las motivaciones del presente trabajo de investigación: proporcionar saneamiento accesible a la población.

Como antecedente, la NOM-001-SEMARNAT-1996, estableció el cumplimiento gradual y progresivo conforme a los rangos de población para las descargas municipales y conforme a la carga contaminante expresada como demanda bioquímica de oxígeno (DBO) para las descargas de aguas residuales municipales.

Dadas las demandas actuales para el tratamiento de aguas residuales era necesario modificar y la NOM- SEMARNAT-1996, con el fin de mejorar la gestión, clasificación y protección de los cuerpos receptores de agua propiedad de la nación, por lo que en la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021, algunos de los parámetros han sido modificados o cambiados totalmente.

Con base en los resultados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA), se ha identificado la presencia de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los cuerpos receptores del país, tomando como referencia y metodología de parametrización de contaminantes la DQO, toxicidad, color y otros parámetros de calidad del agua. Por lo tanto, fue imperioso cambiar la regulación de los mismos parámetros para lograr reducir la contaminación de las aguas que son bienes nacionales.

A continuación, se enlistan y se describe la importancia de los cuerpos receptores de agua a los que se refiere la NOM-001-SEMARNAT-2021.

- 1- Los Humedales son un eslabón en el ciclo del agua y son estratégicos para nuestro país por su riqueza biológica y la cantidad de vida que albergan y sostienen. Los humedales son vulnerables a la contaminación proveniente de las descargas de aguas residuales, las cuales causan pérdidas y daños irremediables como lo son la erosión, la sedimentación y la introducción de patógenos ajenos a los sistemas que causan la pérdida del hábitat. Por esta razón, es importante el cuidado de los humedales, debido a que son aguas superficiales y de baja capacidad de dilución por lo que requieren de condiciones de descarga específicas.
- 2- Los ecosistemas cársticos, resaltan por su importante valor por su contribución al abastecimiento de agua de diferentes regiones del sureste de

México. Sus formaciones naturales características los vuelven muy atractivos para la actividad turística, lo que los convierte en impulsores de empleo y de ingresos para la población local. Así mismo, los ecosistemas cársticos resaltan por su importancia y relevancia en la constitución de un hábitat que asila gran cantidad de flora y fauna endémica de un valor incalculable; sin embargo, por sus mismas características permeables y de rápida filtración, hace que este ecosistema sea vulnerable a la contaminación proveniente de las descargas de aguas residuales y que los mantos acuíferos se contaminen directamente.

La nueva NOM-001-SEMARNAT-2021, tiene como objetivo establecer los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, con el fin de proteger, conservar y mejorar la calidad de los recursos hídricos del país (véase la Tabla 1).

Esta norma, es de observancia obligatoria para los responsables de las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores de agua propiedad de la nación, cabe destacar que, no aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes destinados exclusivamente para aguas pluviales ni a las descargas que se vierten directamente a sistemas de drenaje y alcantarillados municipales.

La alta concentración de contaminantes patógenos y parasitarios, toxicidad, color, metales pesados, contaminantes disueltos medidos como DQO, cianuros, presentan un riesgo para la estabilidad y la calidad de los cuerpos de agua. Para las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, no se debe de exceder el valor indicado como límite permisible, de acuerdo con el tipo de cuerpo receptor. Estas especificaciones se muestran en la Tabla 1 establecidas por esta Norma Oficial Mexicana (NOM-001- SEMARNAT-2021).

Tabla 1. Parámetros permisibles para descarga de aguas residuales a cuerpos receptores de agua propiedad de la nación. Diario Oficial de la Nación (2021).

Parámetros (.) (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Ríos, arrollos, canales y lagunas			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas y estuarios			Suelo					
										Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos		
-	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.
-															
Temperatura	35	35	35	35	35	35	40	40	40	35	35	35	35	35	35
Grasas y Aceites	15	18	21	21	15	18	15	18	21	15	18	21	15	18	21
Sólidos Suspendidos Totales (TSS)	60	72	84	20	24	28	20	24	28	30	36	42	100	120	140
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	150	180	210	100	120	140	85	100	120	60	72	84	150	180	210
Carbon Orgánico Total	38	45	53	25	30	35	21	25	30	15	18	21	38	45	53
Nitrógeno Total	25	30	35	20	25	30	25	30	35	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Fósforo Total	15	18	21	12	15	18	15	18	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Huevos de Helmintos (Huevo/Litro)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Escherichia Coli. (NMP/100)	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400
Enterococos Fecales (NMP/100)	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400
pH	6.5-8.5														
Color	Puerza del 15%														
Toxicidad aguda (UT)	Menor o igual a 5														

A continuación, se mencionan las normas que especifican las técnicas analíticas de cada una de las pruebas realizadas en el presente proyecto. En este apartado se realizó una breve descripción de las normas, para más información sobre la metodología implementada en las pruebas de caracterización, véase 0.

Norma Mexicana NMX-AA-093-SCFI- ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTROLÍTICA - MÉTODO DE PRUEBA

Esta norma oficial mexicana establece el método de determinación de la conductividad eléctrica en el agua y es aplicable para agua potable, natural, tratada, residual, salina y residual tratada.

Este método se basa en la propiedad que adquiere el agua de conducir la corriente eléctrica cuando tiene iones disueltos. Este fenómeno puede explicarse por medio de la disociación electrolítica. Cuando se disuelve en el agua una base, un ácido o una sal, en la cual una porción de esta se disocia en iones positivos y negativos.

Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2013 ANÁLISIS DE AGUA – MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA

Esta norma mexicana establece el método de prueba para la medición de la temperatura, cuando se usan los instrumentos de medición directa o instrumentos que indican expansiones o fuerzas proporcionales en los cambios de temperatura en cuerpos de agua, aguas salinas, aguas residuales tratadas municipales e industriales en el intervalo de 0°C a 45 °C.

Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2016 ANÁLISIS DE AGUA. - MEDICIÓN DEL pH EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS. MÉTODO DE PRUEBA

Esta norma es de aplicación nacional y establece el método de prueba para la medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, en el intervalo de pH a 0 a pH 14 y en un intervalo de temperatura de 0° C a 50°C.

La medición del pH del agua es muy importante para muchos tipos de muestra. Los valores altos y bajos de pH son tóxicos para los organismos acuáticos, equipos y para el contacto o consumo humano.

Norma Mexicana NMX-AA-017-1980, Aguas-Determinación de color

La presente norma establece el método de prueba mediante espectrofotómetro hará la determinación de color en aguas.

El termino color tal cual se aplica en aguas, se refiere a el valor numérico de luminancia, longitud de onda obteniendo la medición de la luz transmitida después de eliminar sólidos suspendidos y las partículas coloidales.

Norma Mexicana NMX-AA-030/2-SCFI-2011 ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA - PARTE 2 - DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO – MÉTODO DE TUBO SELLADO A PEQUEÑA ESCALA

Esta norma mexicana especifica un método para la determinación de la demanda química de oxígeno usando el método de tubo sellado. La prueba es aplicable a cualquier muestra acuosa, que incluye todo tipo de agua residual y de desecho industrial.

El valor de la demanda química de oxígeno del agua, determinado por medio de este método puede ser considerada como medida aproximada de la demanda teórica de oxígeno, por ejemplo: la cantidad de oxígeno consumida en la oxidación química total de constituyentes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua.

3. Antecedentes

La electroquímica se remonta a principios del siglo XVIII, cuando Alejandro Volta llevó a cabo su investigación y aportación a la ciencia con la invención de la pila voltaica. Anteriormente, a finales del siglo XVII Luis Galvani observó que el contacto de dos metales con el músculo de una rana muerta originaba una corriente eléctrica y, en consecuencia, un movimiento de contracción de dicha extremidad, como si estuviese viva. Posteriormente, Galvani se dio cuenta de que cada metal presentaba un grado diferente de reacción en la pata de rana, lo que implica que cada metal tiene una carga eléctrica diferente. A partir de esto se originó la teoría del galvanismo, según la cual, el cerebro de los seres vivos produce electricidad que es transferida por los nervios y acumulada en los músculos y esto produce movimiento. El fenómeno galvánico se dio a conocer en todo el mundo y comenzó a ser estudiado por una gran cantidad de científicos. Y esta investigación generó en Alejandro Volta un gran interés y comenzó a experimentar únicamente con metales, llegando a la conclusión de que el tejido muscular animal, no era necesario para producir corriente eléctrica. En el año 1800, Volta realizó con éxito la demostración de una pila hecha con discos de plata y Zinc, colocados de forma alterna y separados por discos de cartón humedecidos con salmuera. Se producía un flujo de corriente eléctrica que por primera vez era constante. Gracias al invento de Volta los físicos pudieron empezar a trabajar con corriente eléctrica que podían manipular a voluntad. Poco tiempo después otros investigadores descubrieron que la corriente eléctrica podía descomponer los iones de hidrógeno y oxígeno presentes en el agua; dando paso a las primeras prácticas de lo que conocemos hoy en día como electroquímica, la cual es piedra angular para el avance científico que nos llevó a la realización de este trabajo. Conceptos tan importantes como los mencionados anteriormente, dieron sentido a las metodologías para desarrollar experimentos para el tratamiento de aguas residuales. (Imesol., 2017).

El término de la palabra electroquímica ha pasado por muchos cambios durante bastante tiempo. Esta disciplina ha evolucionado desde los principios e ideas relacionadas con los imanes y electromagnetismo a principios del Siglo XVI, hasta que culminó con los primeros procesos de producción de electricidad y la revolución industrial a finales del siglo XIX. Fue hasta 1896 en *Louisville, Kentucky* cuando se realizó el primer proceso electroquímico de tratamiento de agua procedente de las ciénegas del río Ohio, en donde se utilizaron electrodos de hierro y aluminio, sin embargo, el primer proceso parametrizado de tratamiento de aguas mediante electroquímica se realizó en 1908, donde se realizó el mismo proceso en Santa Mónica, California con reducciones del 40% de contaminantes. (Mollah y Yusuf A., 2001).

El término “electroquímica” se empezó a usar formalmente en procesos (electroquímicos) para el desarrollo de procesos e investigación en baterías, celdas de combustible, la prevención de la corrosión de los metales, el uso de celdas electroquímicas para eliminar compuestos orgánicos y contaminantes en cuerpos

de agua, aguas residuales y con la mejora de procesos o técnicas de refinación de productos químicos.

3.1 Generalidades de la ionización electroquímica

3.1.1 Conductividad del agua relacionada con la ley de Ohm

La ley de Ohm es la base para la medición de la conductividad eléctrica. Esta ley define la resistencia al flujo de electricidad entre dos puntos en un circuito; una fuerza electromotriz (E) de 1 voltio hará que una corriente (I) de 1 amperio fluya contra una resistencia (R) de 1 ohm. La ecuación de la ley de Ohm es $E = I * R$. La cantidad de resistencia impuesta por el alambre en un circuito simple tiene que ver con la relación proporcionalmente directa entre la longitud (L) del alambre que es inversamente proporcional al diámetro del alambre. El agua conduce la electricidad a través de los iones disueltos en ella y el agua pura es un conductor pobre de la electricidad. La mayoría de las aguas naturales, sin embargo, contienen iones disueltos y, como resultado, su conductividad aumenta con mayor concentración de iones totales. (Global Seafood Alliance, 2022).

3.1.2 Electroquímica

La electroquímica es una rama de la fisicoquímica que se refiere las reacciones químicas de intercambio de electrones que ocurren en la superficie de un electrodo. Una de sus finalidades es conocer las reacciones químicas que se producen en la interfaz electrodo-electrolito. (Electroquímica, s. f., 2023)

3.1.3 Ánodo y cátodo en ionización electroquímica

Los términos cátodo y ánodo fueron definidos en 1834 por William Whewell, quien adaptó las palabras del griego “*kathodos*”, que significa “descenso” o “bajada”, como el terminal por el que sale la corriente de un dispositivo, pues el ánodo es el terminal por el que entra la corriente convencional. Tiempo después, estos conceptos fueron definidos como hoy se les conoce (Osorio, 2022).

La diferencia significativa entre el ánodo y el cátodo es que en el ánodo se produce la oxidación y en el cátodo se produce la reducción. Se suele confundir erróneamente que el ánodo es específicamente de carga positiva y el cátodo de carga negativa lo cual depende de la interpretación del sistema electroquímico del que se estudia, ya sea del tipo galvánico o del tipo electrolítico.

El electrodo se conforma por un material conductor/semiconductor eléctrico dentro de la celda electroquímica. Además, especifica la fase conductora donde tiene lugar la transferencia de portadores de carga. Ahora bien, un electrodo que pierde electrones y es aceptado por el electrolito sufre una oxidación. En cambio, cuando se produce la operación contraria, es decir, cuando el electrodo gana electrones que son liberados por el electrolito, experimenta una reducción. Por lo tanto, el ánodo atrae las partículas de carga positiva y el cátodo atrae las partículas de carga negativa.

3.1.4 Funcionamiento de un reactor electrofítico

En un reactor electroquímico ocurren dos fenómenos como lo son la oxidación y la reducción a través del paso de una corriente eléctrica suministrada por un electrodo denominado ánodo y cátodo en contacto con una solución conductora de electricidad, llamada electrolito. Se considera que para que este tipo de reactor funcione de manera correcta, debe haber una oxidación del cátodo y una reducción del ánodo. Como se muestra en la siguiente Figura 1.

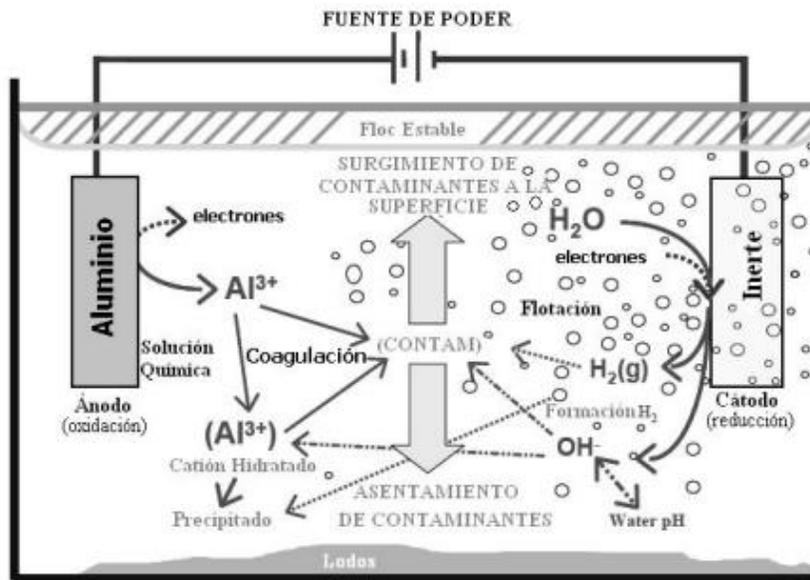


Figura 1. Representación gráfica de mecanismo de acción de ionización electroquímica.(Mollah, 2004)

La corriente eléctrica es transportada a través del electrolito donde se lleva a cabo un desplazamiento de los electrones presentes y donde se generan iones de hidrógeno (H^+), estos iones son atraídos hacia el cátodo, se produce un fenómeno similar tomando en cuenta el ánodo y su proceso de reducción dando origen a iones hidróxilo (OH^-) que son atraídos hacia el ánodo. (Soberanis Piña et al., 2011).

Para el diseño y construcción de un reactor electroquímico es necesario que se tenga en cuenta parámetros como son:

1. Voltaje
2. Densidad de corriente
3. Electrodo (Quintanela y Redondo, 2006)

3.2 Ionización electroquímica

La ionización electroquímica es una tecnología utilizada para el tratamiento de aguas residuales, en la que los contaminantes de muy diversas características son removidos por el principio de la coagulación favorecida por una corriente eléctrica que es aplicada al medio líquido (electrolito).

En este proceso electroquímico se desestabilizan las moléculas contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en las aguas residuales procedentes de la actividad antropogénica. Se induce esta corriente eléctrica en el agua por medio de placas metálicas en paralelo (ánodo y cátodo), los materiales más utilizados son las de hierro y aluminio. La corriente eléctrica suministra al electrolito una fuerza electromotriz capaz de provocar ciertas reacciones químicas, cuyo objetivo principal es desestabilizar o descomponer las moléculas contaminantes. Cuando esto ocurre, se generan (flóculos) de características hidrofóbicas que se precipitan o flotan en el agua. De esta forma se facilita su remoción por algún método de separación mecánico. Los iones metálicos formados durante el proceso son liberados y se dispersan en el medio líquido formando óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes desestabilizados. (M. Mohammad,2004).

3.2.1 Descripción del fenómeno de ionización electroquímica

En la ionización electroquímica ocurren una serie de procesos fisicoquímicos que descomponen a los contaminantes y permiten la remoción.

Los electrodos reaccionan proporcionando iones positivos y negativos. El ánodo provee los iones metálicos, de esta manera el mismo electrodo funge como un “electrodo de sacrificio” debido a que la placa metálica se degrada, mientras la placa metálica que conforma el cátodo permanece sin degradarse. Los iones producidos desestabilizan la carga que poseen los contaminantes presentes en el agua y cuando estas cargas se han degradado o neutralizado, las partículas degradadas quedan en suspensión y esto permite la formación de flóculos que por diferencia de densidades son separados del agua a tartar.

3.2.2 Factores Involucrados en la Ionización electroquímica

Dentro de los factores involucrados en la ionización electroquímica se consideran:

-La conductividad eléctrica del agua, debido a la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica a través de los iones presentes en ella (electrolitos) lo que facilita el desplazamiento de la corriente eléctrica suministrada por los electrodos.

-La temperatura del agua, cuyo aumento influye en la solubilidad del agua.

-Dureza del agua, que representa una medida de la cantidad de metales alcalinotérreos presentes en el agua (calcio y magnesio).

-El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso del metal para formar el ion hidróxido.

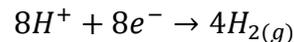
- Densidad de corriente: es importante parametrizar las variables eléctricas en este proceso, ya que la densidad de corriente influye directamente en la remoción de los contaminantes de las muestras de agua residual y está ligada al factor económico.

La remoción es dependiente de la corriente eléctrica, y el consumo de energía incrementa proporcionalmente con la densidad de corriente, esto conduce al aumento de la temperatura del agua por el aumento consecuente de la resistencia eléctrica del sistema. Una densidad de corriente grande produce una disminución significativa en la eficiencia del tratamiento porque los flóculos se desestabilizan por la temperatura elevada. La selección del valor de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta parámetros de operación como el pH y la temperatura. (HOLT, et al., 2005).

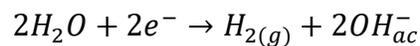
3.2.3 Reacciones químicas dentro del reactor electrolítico empleado

En el proceso de ionización electroquímica se presentan reacciones que involucran directamente las características específicas de los electrodos a utilizar (hierro y aluminio), lo que puede generar las siguientes reacciones químicas hidróxido de hierro Fe (OH) e hidróxido de aluminio Al (OH) (JIANG, Jia-Quian, 2002).

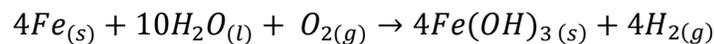
En el cátodo ocurre la reacción:



En el ánodo ocurre la reacción:

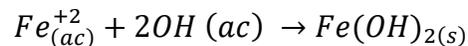
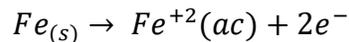


Reacción global:

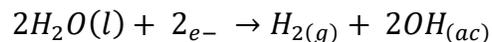


Mecanismo de Formación de hidróxido ferroso

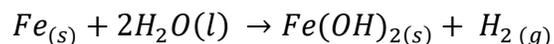
En el ánodo se dan las reacciones:



En el cátodo:

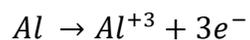


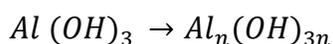
Reacción global:



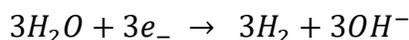
Reacción de electrodos de aluminio:

En el ánodo





En el cátodo:



3.3 Aguas Grises

Se puede definir a las aguas grises como los efluentes provenientes de las actividades de cocina, ducha y lavaderos de los hogares en general, cuando se disponen de manera separada de las aguas que contienen materia fecal (denominadas aguas negras). Las aguas grises presentan un riesgo de transmisión de enfermedades debido a que en ellas pueden estar presentes microorganismos o patógenos. (Núñez.,2014)

Definimos como agua gris al efluente residual proveniente de las duchas, lavadoras, piletas, tarjas de uso doméstico. La cantidad de agua gris depende de las actividades de la población en particular y sus actividades. Por lo general incluye jabón, detergentes, champú, aceites, grasas y diversas sustancias químicas utilizadas en los hogares. En este tipo de agua se puede encontrar actividad viral, bacteriana y parasitaria.

La disposición de los efluentes derivados de actividades domésticas conforma un gran problema sanitario en las zonas urbanas de todo el país, en gran parte debido a que hay zonas en la que no se cuenta con un sistema de alcantarillado y una solución viable sería el presentar tecnologías capaces de tratar estos residuos de manera eficiente y rentable. (Gray, S y Becker, N.,2002).

3.4 Características de las aguas grises

Las aguas grises dependen en primer lugar de la calidad del abastecimiento de agua, en segundo lugar, del tipo de red de distribución para el agua potable y en tercer lugar de las actividades desarrolladas en el hogar. La composición varía considerablemente en términos de la localización, del tiempo, por las variaciones de consumo de agua de cada región y así mismo de los contaminantes vertidos.

-Parámetros fisicoquímicos: Las características físicas más relevantes de las aguas grises son la temperatura, turbidez y los sólidos suspendidos presentes. La temperatura oscila entre los 18° a 38°, en la mayoría de los casos este rango de temperatura es el ideal para el crecimiento microbiológico en ella. La turbidez la causan jabones y detergentes en general usados en los ciclos de lavado. Los sólidos suspendidos varían mucho debido a que las aguas residuales provenientes de las cocinas y zonas donde se lavan y preparan alimentos son variados y estos mismos contaminan el agua con arcilla, arena o residuos de alimentos como semillas, grasas, sólidos de origen animal y jabón. (Eriksson.E et al.,2001).

3.5 Plantas de tratamiento de aguas residuales existentes

La mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales “PTAR” en nuestro país dependen de un tratamiento biológico que consiste en bacterias que degradan la materia orgánica y contaminantes del agua con ayuda de otros procesos de tratamiento que separan la mayoría de los sólidos presentes en el agua residual.

Las bacterias necesitan condiciones fisicoquímicas específicas para realizar sus actividades metabólicas, además, la mayoría de las plantas de tratamiento necesitan suministrar un flujo constante de oxígeno a las bacterias, que sumándose el gasto eléctrico de los equipos de proceso auxiliares (bombas, dosificadores, clarificadores, etc.) demandan demasiada energía eléctrica, lo que eleva los costos de operación. Además, las bacterias presentes en los reactores no soportan cambios fisicoquímicos bruscos, procedentes de descargas anormales. Estos cambios degradan a las bacterias encargadas de remover los contaminantes del agua y esto vuelve poco confiable la disposición del efluente de agua residual y así mismo compromete el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021, causando un daño considerable a los cuerpos de agua propiedad de la nación y al medio ambiente en general.

Además, cabe resaltar que, al momento de diseñar muchas de las plantas de tratamiento de aguas existentes en México, se consideró que éstas cumplieran con la NOM-001-SEMARNAT-1996. Esta norma incluía el parámetro de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) como parámetro guía para la calidad de efluentes de agua para la disposición a cuerpos de agua propiedad de la nación, véase Anexo III.

La DBO como parámetro, fue removido de la nueva norma oficial mexicana y ahora se toma como uno de los parámetros más importantes la DQO. La DQO presenta una mayor robustez y confiabilidad para hacer una determinación general de los contaminantes presentes en el agua residual y en el efluente tratado (véase Tabla 1).

4. Diseño y construcción del reactor electroquímico

En el presente capítulo se presenta una conceptualización del método utilizado para el desarrollo y construcción de un reactor electrolítico de ionización electroquímica. Así mismo, considerando los criterios de diseño recomendados por la bibliografía, se reportan los instrumentos utilizados en la construcción de dicho reactor y los equipos de análisis y caracterización durante la experimentación.

El tipo de enfoque que se llevó a cabo en la construcción de este trabajo es cuantitativo, ya que cuenta con una serie de resultados numéricos y datos secuenciales los cuales no se pueden eludir para el diseño del proceso.

4.1 Diseño de reactor de ionización electroquímica

Los resultados obtenidos en el presente estudio representan un avance importante en el desarrollo de la tecnología de ionización electroquímica. Sin embargo, se requiere una mayor información, conocimiento práctico y datos experimentales de variables: la influencia de la densidad de corriente, el espaciamiento de los electrodos, el número de electrodos, las pérdidas hidráulicas, la formación de los flóculos producto de la reacción electroquímica o la medición de posibles gases generados durante la reacción. Así mismo, se requiere mayor información ya que se presenta un escenario bastante complejo si se quiere diseñar o calcular la cinética de reacción de los contaminantes presentes en el agua residual, debido a que cada especie química presente en el influente tiene características específicas, dependiendo de su procedencia. Por lo tanto, es muy recomendable generalizar y parametrizar el influente hacia un resultado de análisis que permita cuantificar de manera general la calidad y contenido de las aguas residuales.

Este conocimiento es muy necesario para lograr un diseño efectivo de los reactores de ionización electroquímica y contar con el propósito de una mejora de este proceso en términos de su eficiencia de tratamiento, lo que puede apuntalar a esta tecnología para implementarse en el tratamiento de aguas residuales a escala real.

La bibliografía enuncia que los parámetros de mayor relevancia en el diseño de reactores de ionización electroquímica son la densidad de corriente eléctrica, el voltaje, la conductividad eléctrica de los electrodos y del electrolito y la separación entre los electrodos. Estos factores determinan el consumo de energía durante el proceso, lo que es de importancia para la viabilidad y sustentabilidad del proceso. (Soberanis-Piña *et al.*, 2011)

El diseño del reactor más simple y utilizado es en lote, pero también se puede recurrir a un diseño continuo, en el cual los electrodos se disponen de una manera en la que las placas estén paralelas conectadas a una fuente de voltaje. (Mollah, 2001).

De acuerdo con las corridas preliminares realizadas en reactores tipo lote se obtuvo una gráfica de remoción de contaminantes medidos con la DQO, en la que se observó la remoción de contaminantes en mg/L y el porcentaje de remoción con respecto al tiempo (Ver Figura 2).

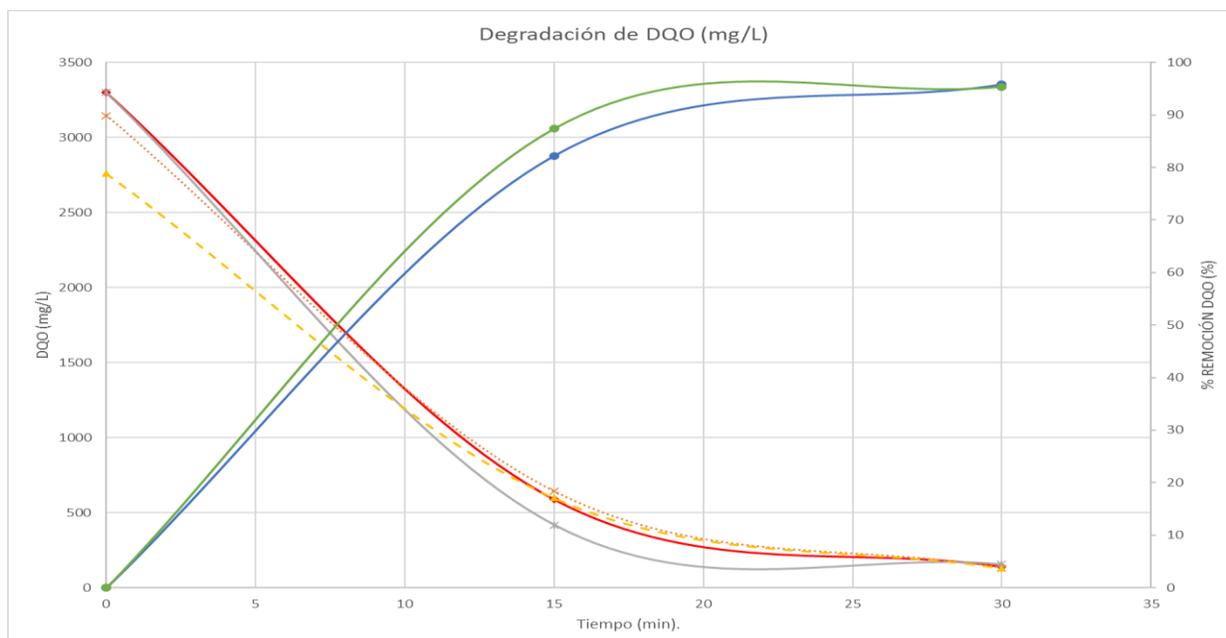


Figura 2. Remoción de DQO en reactor en lote con electrodos de hierro a diferentes densidades de corriente. (Desarrollo propio) 2022

El área ocupada por los electrodos y el volumen del reactor se define como zona de reacción, en esta se llevan a cabo los procesos de desestabilización de las partículas, coagulación y sedimentación. De estos procesos se generan una especie de lodos que se depositan en la parte superior del reactor o al fondo de este mismo. Debido a la densidad de dichos lodos los cuales flotan en la parte superior del agua y otra parte de ellos precipitan hacia el fondo de los reactores electroquímicos, lo cual facilita la remoción de estos mismos.

4.2 Selección de material de los electrodos

De la investigación bibliográfica se muestra una revisión de varios estudios relacionados con la ionización electroquímica en los últimos años, enfatizando en los resultados que muestran el análisis de las principales variables de operación considerando la densidad de corriente, el material, la distancia de los electrodos, voltaje, amperaje, pH, temperatura, conductividad eléctrica del agua y tiempos de residencia.

Tomando en cuenta los criterios de diseño y selección de material para los electrodos que llevarán a cabo el proceso de ionización electroquímica, dentro de la variedad de metales se seleccionó el aluminio y el hierro debido a las siguientes razones.

- La disponibilidad de los metales.
- Son materiales relativamente baratos.
- Existe una amplia información bibliográfica en la que se reportan buenos porcentajes de remoción con estos materiales.
- Son los materiales más utilizados en las pruebas de laboratorio de dicho experimento. Como se puede mostrar en la Tabla 2 y en la Tabla 3 .
- De acuerdo con los datos generados experimentalmente se llegó a la conclusión de que los electrodos de hierro y aluminio presentan mejor desempeño para este tipo de agua residual.
- El diseño de un proceso en continuo que presenta una alternativa y una mejora a los procesos en lotes que se reportan en la bibliografía.
- La experiencia propia en los experimentos realizados en el reactor en lotes ver Figura 3.

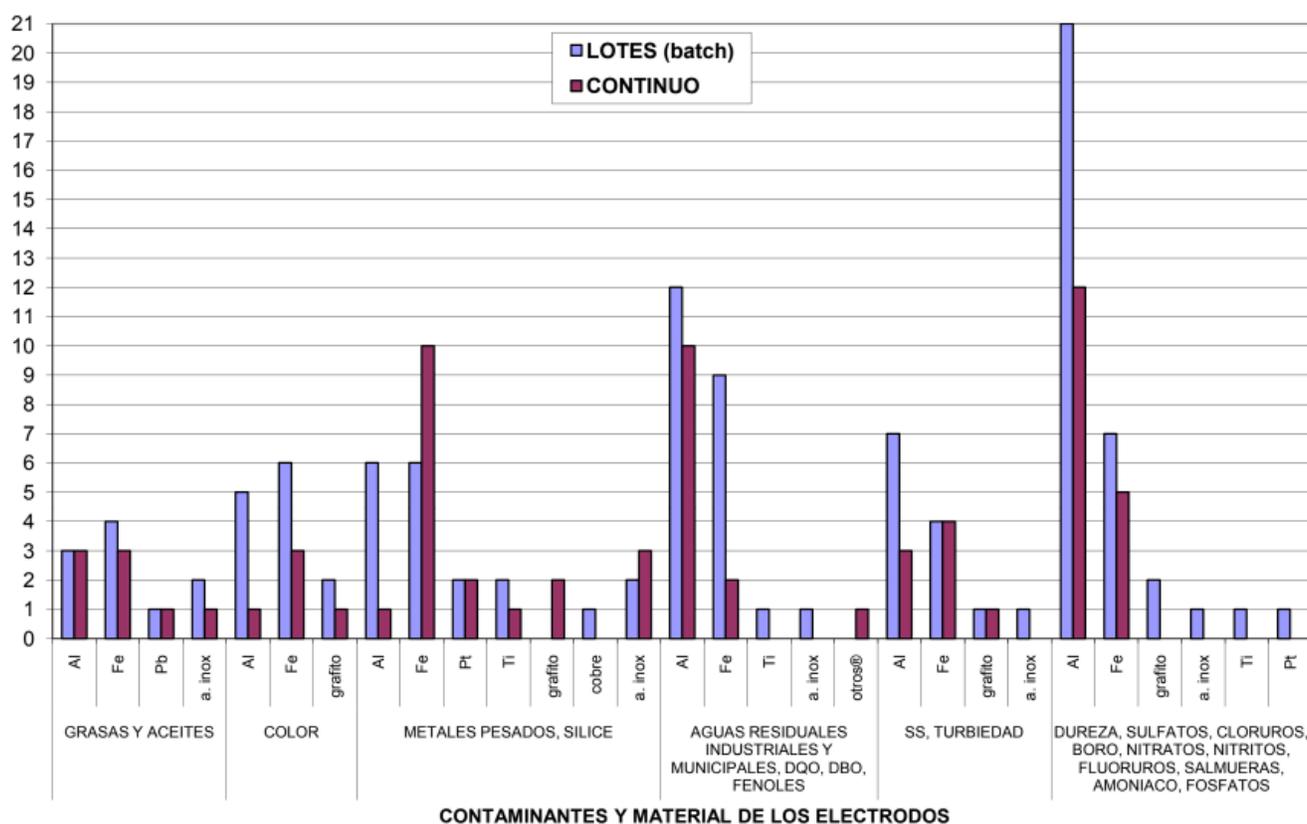


Figura 3. Tipo de contaminantes removido según material utilizado en electrodos en pruebas tipo *Batch* y continuo empleando ionización electroquímica.(Mohammad,2004).

Tabla 2. Revisión bibliográfica de estudios relacionados a la electrocoagulación (Piña Soberanis et al.,2011) parte 1.

Autor	Voltaje p/corriente (A/cm2)	Material de electrodos	pH	Contaminante	Resultados
Gorodovkyh. V.E(1987)	N.R. 0.2021-0.035	Acero inox y grafito	7 a 12	Cu,Pb,Sn,Zn,Mn,Sb,Bi	Se alcanzó una remocion de los metales a condiciones de pH de 11-11.5 aplicando corriente asimetrica alterna.
Renk Russel(1988)	N.R. N.R	Fe,Al,Grafito y Ti	NR	Metales pesados,Color, CN,PO4,F, Grasas ,Aceite, SO4	La Tecnologia no tiende a remover materiales que no forman precipitados tales como Na, K , solventes de peso ligero como el tolueno y benceno. Sin embargo a ciertas condiciones convertirá iones cloruro a gas cloro, nitratos de amonio ademas de oxidar o reducir compuestos organicos.
Biswas N. (1991)	0-100 0-6 Amp	Acero Inox	3 a 11	Remocion de aceite de emulsiones.	La desestabilizacion de las emulsiones fue posible mediante el uso de sulfato ferrico unicamente, pero se requirieron dosis elevadas. La mayor eficiencia de remocion encontrada fue de 99% utilizando 150mg/L de sulfato ferrico y a una corriente directa de 100 V durante 16 min.
Wang Sanfan(1991)	0-3.1 2 - 22E-4	Fe y Al	NR	Dureza y alcalinidad	Utilizando estos electrodos y aireacion con la recirculacion y mezcla de los flocs del sedimentador en el agua cruda , se remueve un 75% de dureza aplicando 22E-4 Amp/cm2 y 2.2 V.
Pouet M-F (1992)	40 6E-4 a 0.0015	Al	NR	DQO, SS, Turbidez	La combinacion de la EC mostro ser una buena alternativa para el tratamiento de aguas residuales por su alta eficiencia y lo compacto del sistema.
Pouet M-F (1995)	40 a 80 0.0053	Al	7.7 a 8	DQO, SS, Turbidez	Se removio una cantidad aproximada al 75% de los contaminantes.
Tsai Ct(1996)	1 a 15 NR	Fe, Al, Cu	8.2 a 8.5	DQO	Se alcanzaron eficiencias de remocion entre un 30-50% donde el par de electrodos de hierro y cobre presento una mayor eficiencia.
Baklan V, (1996)	3.0 y 3.5 0.0120	Fe, Al	NR	Cianuros, aminas, alcoholes, aldehidos y sulfuros	La electrocoagulacion es muy efectiva para la clarificacion de aguas residuales de compuestos organicos complejos.
Paul A.B(1996)	N.R. N.R	Al	6.5 a7.5	Turbidez	Se alcanzo alta remocion de turbiedad ademas de que se demstro que los sistemas de tratamiento a pequeña escala son mas baratas que los sitemas tradicionales.

En la Tabla 2 y Tabla 3 se muestra el resumen de los resultados experimentales realizados por varios autores, los cuales detallan el tipo de material utilizado para los electrodos y los contaminantes removidos para los cuales se optó por la implementación de electrodos de hierro y aluminio para la realización de la experimentación de este trabajo de investigación. Debido a la cantidad de contaminantes eliminados reportados en dicha tabla se tomó como un buen punto de partida para tomar como criterio de selección el hierro y aluminio para la degradación de contaminantes presentes en las aguas grises vease Figura 3.

Tabla 3. Revisión bibliográfica de estudios relacionados a la electrocoagulación (Piña Soberanis et al.,2011) Parte 2.

Autor	Voltaje p/corriente (A/cm2)	Material de electrodos	pH	Contaminante	Resultados
<i>Hosny Ashraf Y (1996)</i>	2.2 a 12.5 0.0025 a 1.35	Acero Inox Y Pb	4.5	Emulsiones y aceite	Fueron hechos modelos de correlacion para relacionar los parametros de operacion con el porcentaje de remocion de aceite. Los resultados experimentales coincidieron con los modelos teoricos desarrollados.
<i>Kovatcheva Valeria(1999)</i>	NR 0.0125	Fe	2.8 a 3.2	So4, Cl	Se observó que las ondas sonoras aplicadas al electrolito no destruyen significativamente la fase de hidróxidos formados y no intervino en los proceso de aborcion iónica molecular donde se absorben las particulas coloidales.
<i>Ciorba.G.A.(2000)</i>	NR 0.001 y 0.003	Al	4.2	DQO	La eficiencia del tratamiento de agua residual alcanzó valores de 40 a 60% como remocion de DQO, dependiendo de las condiciones previamente establecidas.
<i>Phutdha-Wong W(2000)</i>	22 000167	AL	NR	Compuestos fenólicos	A partir del análisis del método utilizado para la recuperacion de compuestos fenólicos estudiados, se sugiere que no todos los compuestos fenólicos son preferentemente oxidados y existe un cierto grado de selectividad.
<i>Balansubramaniam (2001)</i>	NR 0.0125	Fe y Acero Inox	4.5	Arsénico	La remocion electroquímica de arsénico bajo estas condiciones alcanzó el 99%. El pH de la solucion se incremento gradualmente conforme la electrólisis avanzó
<i>Mameri. N. (2001)</i>	NR 0.0053 a 0.006	Al	5 a 7.6	Fluor	El proceso para la remocion de Fluor resulto eficiente a 60%. El proceso consumo 40 kg de aluminio por 1000m3 de aguatrutada.

4.3 Dimensionamiento

Para los reactores de ionización electroquímica se parte de una geometría de un prisma rectangular. Se diseñó considerando una distribución volumétrica que contempla tres regiones: la región superior es en donde se encuentran los lodos menos densos y las espumas “zona de flotación”; una región intermedia, en donde se llevan a cabo las reacciones electroquímicas entre los electrodos: “zona de reacción” esta es la zona que más volumen y espacio demanda dentro de los reactores, debido al espacio que ocupan los electrodos; finalmente se tiene la zona en donde se lleva a cabo el fenómeno de ionización electroquímica. En la tercera sección es donde se precipitan los lodos de mayor densidad “zona de sedimentación”, véase Figura 4. (Arango Ruíz y Garcés Giraldo, 2007).

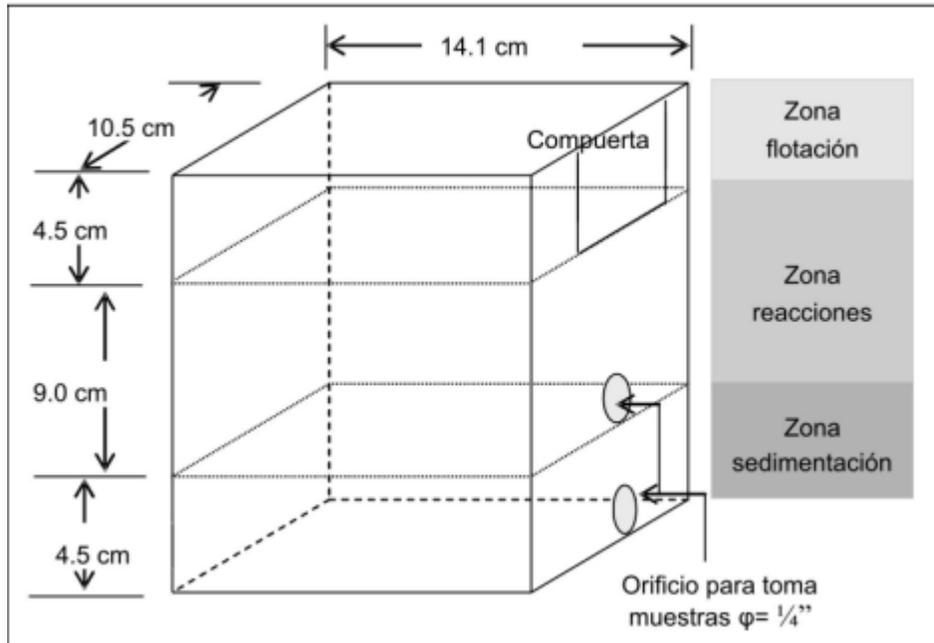


Figura 4. Geometría de reactor en lote Arango Ruíz y Garcés Giraldo. 2007

Para el diseño geométrico de los reactores se recomienda que su diseño contenga una ventilación y no se encuentre sellado totalmente debido a la continua emisión de gases producidos por la reacción electroquímica, además se evita la presurización del reactor y se permite la limpieza continua de los lodos que flocculan en la parte superior del electrolito.

Por esta razón se optó por construir tres reactores de geometría rectangular con electrodos de hierro y dos reactores con electrodos de aluminio que funcionaran como uno solo, debido a las limitantes de espacio en la planta prototipo. Se utilizó material acrílico para el contenedor, por sus características no conductoras es un material apto para los fines de este proceso.

El diseño y dimensionamiento partió de los cálculos y consideraciones que se muestran a continuación:

-Se definieron las dimensiones del primer reactor, el reactor con electrodos de hierro:

Largo: 74 cm

Ancho: 20 cm

Alto: 24.5 cm

-Para calcular el volumen del reactor partimos de la ecuación 1.

$$v = (a)(b)(c) \quad \text{Ecuacion 1}$$

Donde a= Largo, b=Ancho, c= Alto, como se muestra en la Figura 5.

$$v = (74 \text{ cm})(20 \text{ cm})(24.5 \text{ cm}) = 36260 \text{ cm}^3$$

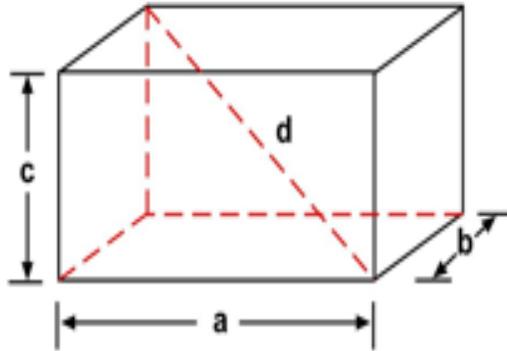


Figura 5. : Representación gráfica de prisma rectangular

Para obtener el volumen en litros, partimos de la ecuación 2, para realizar la conversión de unidades en sistema internacional de centímetros cúbicos a litros.

$$\text{Litros} = \frac{\text{cm}^3}{\frac{1000 \text{ cm}^3}{L}} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\text{Litros} = \frac{36260 \text{ cm}^3}{\frac{1000 \text{ cm}^3}{L}} = 36.26 \text{ Litros}$$

Para el cálculo y diseño de los electrodos de hierro, se toma como apoyo la ecuación 1 para calcular el volumen ocupado por cada uno de los electrodos.

Largo: 71 cm

Ancho: 0.11cm

Alto: 13.5 cm

$$v = (a)(b)(c)$$

$$v = (71\text{cm})(0.1\text{cm})(13.5\text{cm}) = 95.85 \text{ cm}^3 \text{ de un electrodo de Hierro}$$

Los electrodos se diseñaron como placas tipo prisma rectangular dispuestas en serie, además de esto cabe resaltar que estos metales se comercializan como láminas y placas de diferente tipo de espesor. Se estableció una distancia entre electrodos de 1.2 cm a 2.5 cm, para permitir el flujo del agua residual durante la

ionización electroquímica, el número de electrodos en serie está dado por la ecuación 3. (Moreno-Casillas *et al.*, 2007)

$$\text{Número de electrodos} = \frac{(\text{Ancho de celda} - 2 * (\text{Distancia de electrodos a la cara lateral de reactor}))}{\text{Separación máxima entre electrodos} + \text{espesor de placa}}$$

Número de electrodos de hierro

Ancho de reactor: 20 cm

Separación entre placas: 2.0 cm

Espesor de la placa: 0.10 cm

Separación de placa a la cara del reactor: 0.30 cm

$$\text{Número de Electrodos} = \frac{(20 \text{ cm} - 2) * (0.3 \text{ cm})}{2 \text{ cm} + 0.1 \text{ cm}} = 9.8 \text{ placas} \approx 10 \text{ placas reales}$$

Considerando lo anterior, se realiza el cálculo exacto del volumen real del reactor, es decir, el volumen real de agua que contiene el reactor ya con los electrodos de hierro inmersos. Cada placa de hierro tiene un volumen de 95.85 cm^3 , que al multiplicarlo por las 10 placas reales calculadas con la Ec 3 nos da un volumen de 958.5 cm^3 equivalente a 0.95 Litros. Posteriormente se realiza una sumatoria del volumen del prisma, más el volumen ocupado por las diez placas de hierro que conforman los electrodos, resultando un volumen total de 37218.5 cm^3 .

$$\text{Volumen} = 36260 \text{ cm}^3 + 958.5 \text{ cm}^3 = 37218.5 \text{ cm}^3 \approx 37.2185 \text{ Litros}$$

La Figura 6 muestra el diseño y geometría de diseño del reactor de Ionización electroquímica con sus respectivos electrodos de hierro.

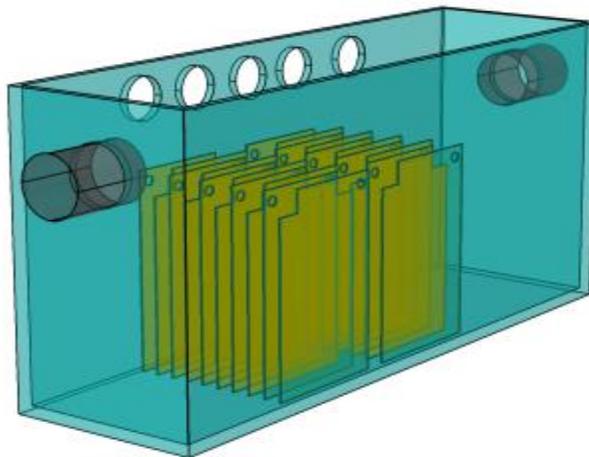


Figura 6. Geometría de reactores de acrílico para electrodos de hierro
2023.Elaboración propia

En el diseño del reactor de aluminio, cabe hacer la siguientes menciones. en este caso particular se diseñaron dos reactores con electrodos de aluminio, los cuales trabajan como si fueran uno debido a la configuración espacial de la planta prototipo.

-Partiendo de la ecuación 1 para el cálculo de el volumen de el prisma rectangular, para los reactores de aluminio, procedemos a definir sus dimensiones.

Reactor de aluminio 1.

Largo: 24.20 cm

Ancho: 13.70 cm

Alto: 15.0 cm

Reactor de aluminio 2.

Largo: 24.50 cm

Ancho: 13.70 cm

Alto: 15.0 cm

$$v = (a)(b)(c)$$

$$v = (24.2\text{cm})(13.7\text{cm})(15\text{cm}) = 4973.1 \text{ cm}^3 \text{Celda 1}$$

$$v = (24.5\text{cm})(13.7\text{cm})(15\text{cm}) = 5034.75 \text{ cm}^3 \text{Celda 2}$$

-Con apoyo de la ec 2 se calcula el volumen del reactor de aluminio.

$$\text{Litros} = \frac{\text{cm}^3}{1000} = \text{Litros} = \frac{4973.1 \text{ cm}^3}{\frac{1000 \text{ cm}^3}{L}} = 4.97 \text{ Litros Celda 1}$$

$$\text{Litros} = \frac{\text{cm}^3}{L} = \text{Litros} = \frac{5034.75 \text{ cm}^3}{\frac{1000 \text{ cm}^3}{L}} = 5.03 \text{ Litros Celda 2}$$

-Lo que ahora corresponde realizar es una sumatoria de ambas celdas para obtener el volumen total del reactor.

$$\text{Volumen total} = \text{Celda 1} + \text{Celda 2}$$

$$\text{Volumen total} = 4.97 \text{ L} + 5.03 \text{ L}$$

$$\text{Volumen total} = 10.00 \text{ L}$$

Al igual que con el reactor con electrodos de hierro, se procede a realizar el cálculo del volumen de la celda con electrodos de aluminio y así mismo con el cálculo del

número de electrodos para la geometría del reactor con electrodos de aluminio. Utilizamos la ecuación 1 para calcular el volumen de una celda.

Largo: 21 cm

Ancho: 0.1 cm

Alto: 13.0 cm

$$v = (a)(b)(c)$$

$$v = (21\text{cm})(0.1\text{ cm})(13.5\text{cm}) = 28.35\text{cm}^3$$

Considerando la ecuación 3, se procede a realizar el cálculo de las celdas correspondientes a la geometría y medidas de las celdas de los reactores de aluminio.

Ancho de reactor: 13.7 cm

Separación entre placas 1.2 cm

Espesor de la placa: 0.10 cm

Separación de placa a la cara del reactor: 0.30 cm

Número de electrodos

$$= \frac{(\text{Ancho de celda} - 2 * (\text{Distancia de electrodos a la cara lateral de reactor}))}{\text{Separacion máxima entre electrodos} + \text{espesor de placa}}$$

$$\text{Número de electrodos} = \frac{(13.7\text{ cm} - 2 * (0.3\text{ cm}))}{1.2\text{ cm} + 0.1\text{ cm}} = 10.08 \approx 10 \text{ placas reales}$$

Se realizó el cálculo del volumen real del reactor considerando el volumen real de agua ya con los electrodos inmersos en los reactores con electrodos de aluminio. Cada placa de aluminio tiene un volumen de 28.35 cm^3 que al multiplicarlo por las 10 placas reales calculadas con la ecuación 3 resulta un volumen de 283.5 cm^3 . Posteriormente se realiza una sumatoria del volumen del prisma, más el volumen ocupado por las diez placas de hierro que conforman los electrodos, el volumen total de cada celda es de 5540.10 cm^3 y 5601.75 cm^3 .

$$\text{Volumen} = 5540.10\text{ cm}^3 + 283.5\text{ cm}^3 + 5601.75\text{ cm}^3 + 283.5\text{ cm}^3 = 11141.85\text{ cm}^3 \\ \approx 11.14\text{Litros}$$

Pero recordando que son dos reactores con electrodos de aluminio que trabajan como uno solo, se multiplican por dos el volumen real de cada reactor de aluminio. Resulta un valor de 21.28 Litros de volumen real.

A continuación se muestra el diseño de la geometría del reactor de aluminio en la Figura 7.

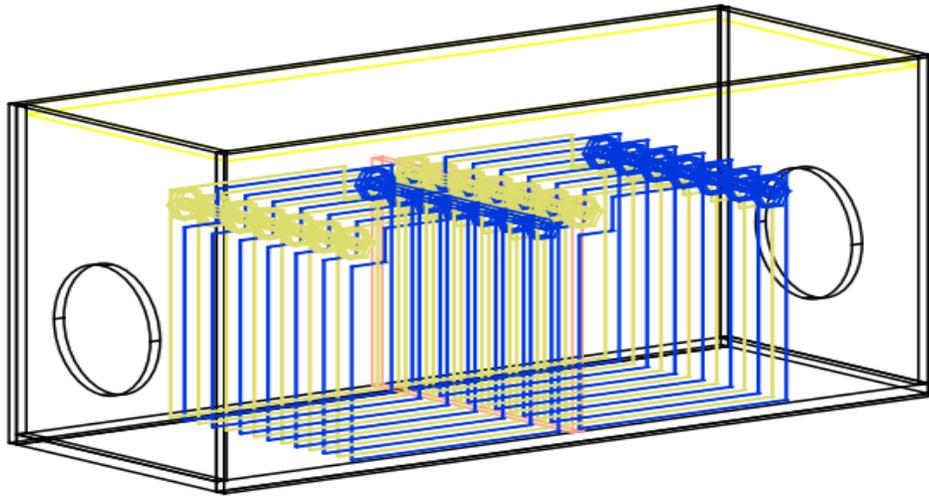


Figura 7. : Geometría de reactores de acrílico para electrodos de aluminio
 .Elaboración propia

4.3.1 Cálculo de tiempo de residencia hidráulico de reactores

Es importante el considerar el Tiempo de residencia hidráulica de nuestros reactores, debido a que ese es el tiempo que el agua permanece en cualquier unidad de tratamiento de aguas residuales.

Su fórmula está dada por la ec. 4:

$$THR = \frac{V(m^3)}{Q\left(\frac{m^3}{hr}\right)} \text{ecuación 4}$$

Donde: V=Volumen, Q= Caudal o Gasto

Se realizaron varias corridas de tratamiento con flujos de 0.7 L/min, 1 L/min y 1.5 L/min para los cuales se muestra con el cálculo del tiempo de residencia hidráulico de cada una de dichas corridas véase Tabla 4.

Tabla 4. : Cálculo de Tiempo de residencia hidráulica de reactores

Reactor con electrodos de Hierro			
Caudal (Q) (L/min)	0.7	1	1.5
Volumen(L)	36.26	36.26	36.26
THR (min)	51.8	36.26	24.17
Reactor con electrodos de Aluminio			
Caudal (Q) (L/min)	0.7	1	1.5
Volumen(L)	22.28	22.28	22.28
THR (min)	31.82	22.28	14.85

4.3.2 Configuraciones eléctricas en las que los reactores pueden operar

El arreglo de los electrodos puede hacerse en forma monopolar en paralelo o en serie , pero se decidió realizar con la configuración en paralelo debido a la geometría propuesta de los reactores y a la manera en que se va a suministrar el flujo de agua “de forma horizontal”, esta propicia una mejor distribución y un flujo de agua más uniforme entre los espacios de las placas, lo que favorece una mayor superficie de intercambio iónico entre el electrolito y los electrodos, como se muestra en Figura 8 y Figura 9.

En la Tabla 2 y Tabla 3 se documentan los voltajes suministrados a los electrodos de hierro y aluminio para el tratamiento de aguas residuales en experimentos previamente realizados. Como en estos experimentos se requiere considerar parámetros como la conductividad eléctrica del electrolito, la separación de los electrodos para determinar la resistencia del sistema y, por tanto, el consumo de energía del proceso y el costo de este tratamiento (Piña Soberanis *et al.*,2011).

Se optó finalmente por el arreglo de los electrodos en paralelo, debido a que en un circuito en serie el voltaje se divide entre los componentes, mientras que la corriente se mantiene constante y en un circuito en paralelo, la corriente se divide entre los componentes, mientras que el voltaje es el mismo en todos los componentes.

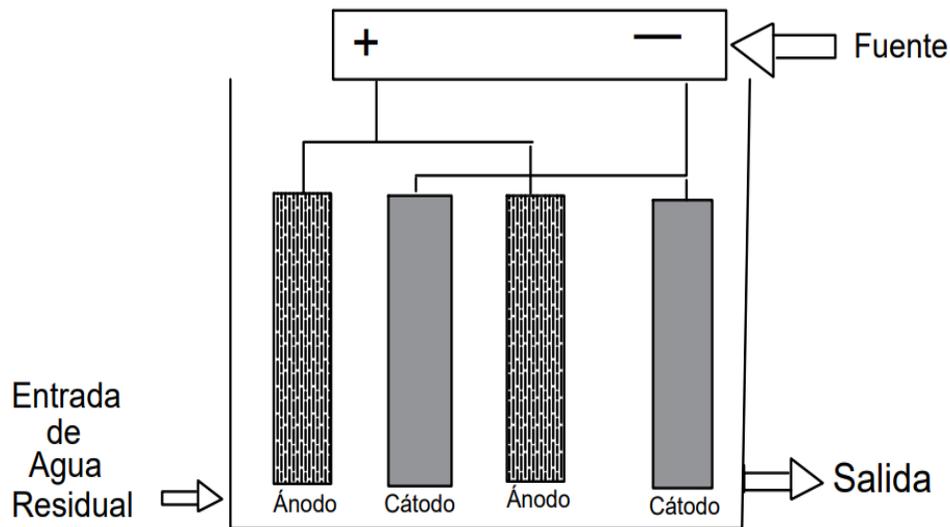


Figura 8. Diagrama de arreglo de electrodos monopolares en paralelo 2023 (elaboración propia)

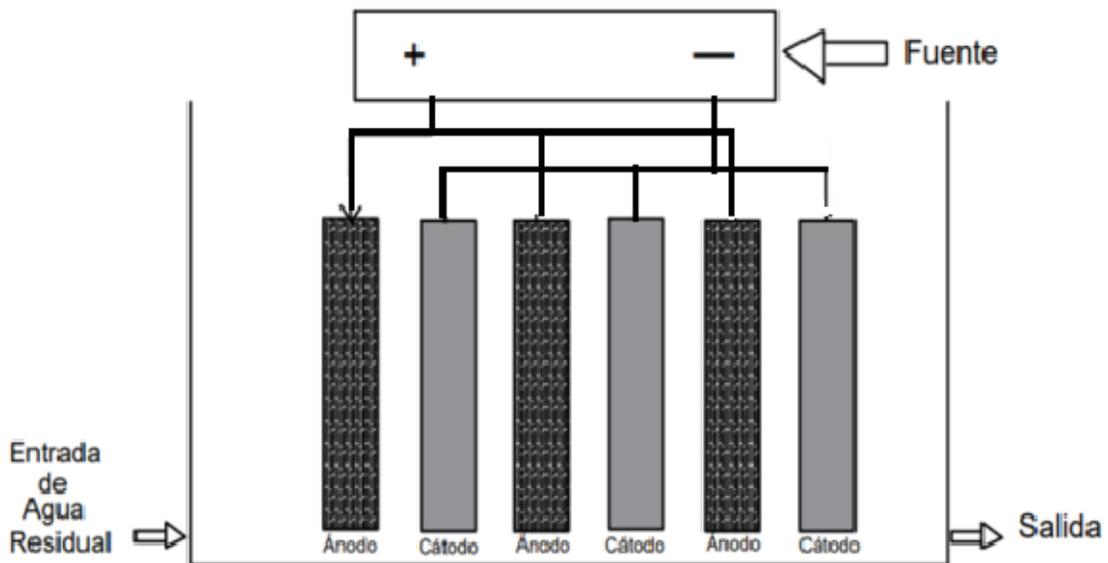


Figura 9. Diagrama de arreglo de electrodos monopolares conectados en serie (elaboración propia)

Se ha encontrado que con densidad de corriente alta hay una mayor probabilidad de que los electrodos se pasiven y por el otro lado, una densidad de corriente baja implica que se tenga que diseñar un reactor de mayor volumen y con mayores tiempos de residencia dentro del proceso. Un valor de densidad de corriente alto

puede disminuir significativamente la eficiencia de la corriente eléctrica debido a la sobreproducción de oxígeno, lo que causa un pasivamiento de los electrodos, por lo que los autores recomiendan que oscile entre valores de 20-25 A/m². (Deshpande et al., 2010, Ghosh et al, 2008).

Dicho de esta forma, la densidad de corriente se expresa y calcula con la ecuación 5:

$$j = \frac{A}{ap} \quad \text{ecuacion 5}$$

Donde j= Densidad de corriente en amperes/m², A= corriente eléctrica en amperios, ap= Área de las placas en m².

El área de las placas se calcula con ayuda de la ecuación 6:

$$\text{Área de placa} = A = 2 * (a * b + a * c + b * c) \quad \text{ecuación 6}$$

Donde: a=Largo de placa, b= Ancho de placa, c= Alto de placa. Una vez realizado el cálculo, se considera el número específico de placas dentro del reactor y esta área se multiplica por ese número de placas.

$$\begin{aligned} \text{Área de placa de aluminio} \\ &= 2 * (0.21m * 0.001m + 0.21m * 0.135m + 0.001m * 0.135m) \\ &= 0.057m^2 \end{aligned}$$

$$\text{Área total de placas} = \text{Área de placa} * \text{No de placas}$$

$$\text{Área total de placas} = 0.057m^2 \text{ aluminio} * 10 = 0.5739m^2$$

$$\begin{aligned} \text{Área de placa de hierro} \\ &= 2 * (0.71m * 0.001m + 0.71m * 0.135m + 0.001m * 0.135m) \\ &= 0.19m^2 \end{aligned}$$

$$\text{Area total de placas} = 0.19m^2 \text{ Hierro} * 10 = 1.93m^2$$

5. Pruebas de ionización electroquímica

5.1 Experimentación

En esta sección se muestra de manera detallada la metodología para la realización de los experimentos de ionización electroquímica para el caso de estudio de aguas grises que este trabajo de investigación sustenta.

5.1.1 Parámetros de caracterización de influente

Se tomó la muestra de aguas grises provenientes de una vivienda de la zona sur de la Ciudad de México (Figura 10 y Figura 11).



Figura 10. Figura : Muestra de aguas grises.

Antes de realizar cualquier prueba con los reactores, se tomaron en cuenta algunos parámetros de la calidad del influente. Con el objetivo de tener parametrizados los datos de entrada y realizar un análisis cuantitativo, se realizaron pruebas de pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, color en unidades platino cobalto (UPC) y determinación de materia orgánica medida como DQO, los resultados se muestran en la Tabla 5 y en la Tabla 6 .



Figura 11. Tanque de almacenamiento de aguas grises.

Tabla 5. Caracterización del influente de aguas grises febrero de 2023 (elaboración propia)

Agua Residual	Feb-2023
pH	7.69
T(C°)	13.4
CE(μs/cm)	760
SDT(mg/L)	370
Color (UPC)	570
DQO mg/L	291

Tabla 6. Caracterización de influente de aguas grises marzo de 2023 (elaboración propia)

Agua Residual	Marzo-2023
pH	7.6
T(C°)	14.4
CE(μs/cm)	892
SDT(mg/L)	450
Color (UPC)	1270
DQO mg/L	300

5.1.2 Pruebas de ionización electroquímica

Descripción de la planta prototipo

Las pruebas de ionización electroquímica se realizaron en el prototipo que se describe a continuación:

Un tanque de almacenamiento de 1.2 m³: su función es almacenar aguas grises, cuenta con una bomba centrífuga que transporta el agua a un sistema de filtrado y posteriormente lo lleva a un tanque de igualación de 0.05 m³, que distribuye el agua hacia los reactores con electrodos de hierro y aluminio, en donde se llevará a cabo el proceso de ionización electroquímica. Una vez pasado el tiempo de residencia hidráulico, el agua se desplaza a un canal de llamado en donde se tomaron las alícuotas para su posterior caracterización.

Se realizaron las pruebas hidráulicas y de flujo con el fin de observar el comportamiento hidráulico de los reactores, así mismo, para identificar posibles filtraciones de agua en el sistema.

Se realizaron pruebas con un flujo constante de 0.7 ,1 y 1.5 L/min y, finalmente, se trabajó con un flujo de 1 L/min debido a que en flujos inferiores, el influente al entrar al reactor se comportaba de manera laminar, lo que presenta un desplazamiento muy lento y una zona de intercambio entre el electrolito y los electrodos menor. Así mismo con la prueba a 1.5L/min no se observó una gran diferencia con respecto al flujo de 1 L/min, así que por fines prácticos y de experimentación se decidió trabajar a 1L/min. Para observar el comportamiento hidráulico del fluido se realizó una prueba con tinta, como se muestra en la Figura 12. La imagen muestra el perfil hidráulico y el comportamiento final del influente, así como la identificación de zonas hidráulicamente muertas que pueden ser mejoradas en diseños posteriores.



Figura 12. Pruebas hidráulicas de Reactores de ionización electroquímica

Una vez comprobado el funcionamiento hidráulico de los reactores, se continuo con el armado de los electrodos en una configuración eléctrica en paralelo, como se muestra en la Figura 8. Cabe resaltar que en el desarrollo de los experimentos se trataron aproximadamente 300 L de agua residual que se hicieron pasar a través de los reactores de hierro (Fe) y de aluminio (Al). Como se muestran en la Figura 13 y Figura 14.



Figura 13. Reactor con electrodos de hierro.

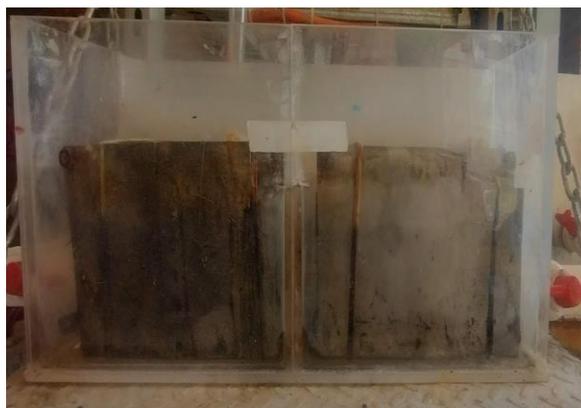


Figura 14. Reactor con electrodos de aluminio

La experimentación se realizó en un proceso continuo con un flujo constante de 1 L/min durante 60 minutos de tratamiento dentro de los reactores electroquímicos. Los voltajes en cada corrida variaron con el fin de observar y cuantificar la densidad de corriente que presenta cada una de las corridas, los resultados de estas pruebas se muestran en la Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10.

Tabla 7. Corrida en continuo de reactor con electrodos de hierro febrero 2023
Elaboración propia

Voltaje	Densidad de corriente A/m ²	Corriente consumida en Amperios C.A
4.2	2.1	1
5.5	5.68	2
6.8	8.29	2.38
8	10.04	3.32
11.5	14.41	6.5

Tabla 8. Corrida en continuo de reactor con electrodos de aluminio febrero 2023 Elaboración propia

Voltaje	Densidad de corriente A/m ²	Corriente consumida en Amperios C.A
4.2	1.70	1
5.5	1.74	2
6.8	6.09	2.38
8	10.45	3.32
11.5	20.9	7.09

Tabla 9. Corrida en continuo de reactor con electrodos de hierro marzo 2023 Elaboración propia

Voltaje	Densidad de corriente A/m ²	Corriente consumida en Amperios C.A
4.2	3.06	0.8
5.5	6.11	2
6.8	8.29	2.48
8	10.48	3.5
11.5	14.85	7.1

Tabla 10. Corrida en continuo de Reactor de aluminio marzo 2023 Elaboración propia

Voltaje	Densidad de corriente A/m ²	Corriente consumida en Amperios C.A
4.2	1.74	0.8
5.5	3.48	2
6.8	8.71	2.48
8	13.94	3.5
11.5	22.65	7.1

En las mediciones realizadas se observó cómo mediante el proceso de ionización electroquímica se fueron formando flóculos de una geometría estable que demuestra la eficiencia del proceso de separación de los contaminantes del agua, como se observa en la Figura 15.

Una vez transcurrido el tiempo de residencia de los reactores. Se tomaron alícuotas para su posterior análisis y caracterización: Se tomó una muestra a la entrada del reactor con electrodos de hierro, la segunda muestra se tomó a la salida de este mismo y una tercera en la salida del reactor con electrodos de aluminio (Figura 16 y Figura 17).



Figura 15. Formación de flóculos en reactor de aluminio

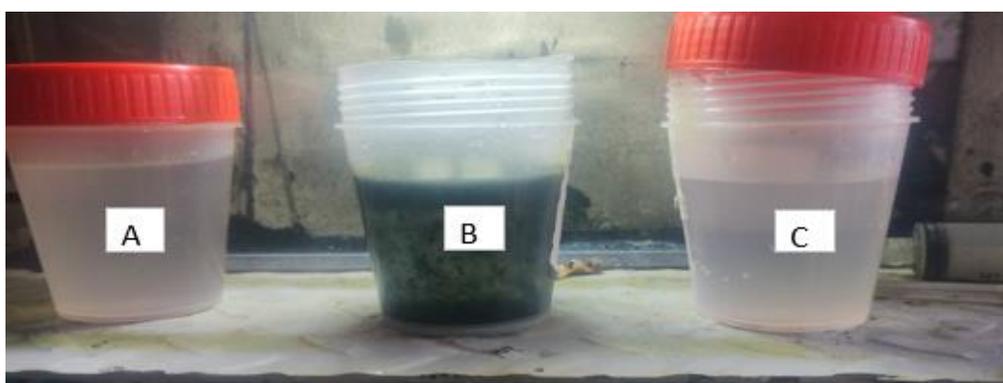


Figura 16. Influyente (A), Efluente del reactor con electrodos de hierro (B), Efluente del reactor con electrodos de aluminio (C).

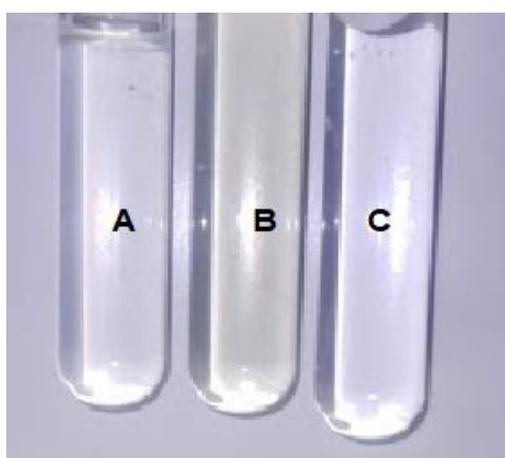


Figura 17. Influyente (A), Efluente del reactor con electrodos de hierro (B), Efluente del reactor con electrodos de aluminio (C).

6. Resultados y análisis de resultados experimentales

En esta sección se muestran los datos cuantitativos del proceso de ionización electroquímica DQO, pH, conductividad del agua, SDT, temperatura y color aparente. Para determinar la eficiencia del sistema y el porcentaje de remoción de los contaminantes del agua mediante esta tecnología.

6.1 Equipos de análisis de aguas residuales utilizados

Para la realización experimental se contó con el equipo mencionado en la Tabla 11 siguiente:

Tabla 11. Listado y descripción de los equipos utilizados en análisis de aguas residuales 2023

No	Nombre	No. Identificación	Descripción	Foto
1	Espectrofotómetro HANNA INSTRUMENTS	HI83314-01	Fotómetro multiparamétrico de mesa para medir DQO	
2	Viales con reactivo para DQO HANNA INSTRUMENTS	HI93754B-25	Son viales reactivos que siguen el método EPA aprobado para la determinación de Demanda Química de Oxígeno.	
3	Medidor de conductividad, pH y sólidos disueltos.	HI98130	Es un medidor de alta exactitud de pH, sólidos disueltos, temperatura y conductividad eléctrica.	

4	Termómetro de inmersión digital	TP- 300	Termómetro digital	
5	Digestor de viales HANNA INSTRUMENTS	HI839800-02	Digestor de viales	

Una vez realizadas las corridas y tomadas las alícuotas, se procedió a hacer las pruebas de DQO, pH, conductividad eléctrica del agua, sólidos disueltos totales, temperatura y color aparente. Cada una de las pruebas están sustentadas y respaldadas por las técnicas de análisis y caracterización estipuladas por las normas oficiales mexicanas avocadas a cada uno de los parámetros de medición reportados en la bibliografía.

6.2 Resultados y análisis del proceso de ionización electroquímica

En las siguientes tablas se muestran las caracterizaciones de los influentes de aguas grises, las corridas realizadas a diferentes voltajes, el comportamiento del pH, la conductividad eléctrica del agua, el color aparente del influente. En los datos presentados se muestra el porcentaje de remoción de materia orgánica medida como DQO y la remoción de este mismo parámetro en partes por millón.

Una vez caracterizadas las muestras de agua gris correspondiente a los ejercicios experimentales del mes de febrero y marzo de 2023, se muestran los siguientes datos, que son congruentes y relativamente se obtuvo una calidad de muestra similar en ambas muestras de las pruebas realizadas con agua gris en el mes de febrero y marzo (véase Tabla 12). Algunos de los datos que mostraron una leve discrepancia y esto se debe a que las muestras pudieran contener detergentes de diferente composición (Suavizantes de telas o colorantes desprendidos del proceso e lavado de la tela).

Tabla 12. Caracterización del influente de agua gris febrero-marzo de 2023
Elaboración propia

Agua residual	Febrero-2023	Agua residual	Marzo-2023
pH	7.69	pH	7.6
T(C°)	13.4	T(C°)	14.3
CE(μs/cm)	760	CE(μs/cm)	892
SDT(mg/L)	370	SDT(mg/L)	450
Color UPC	570	Color UPC	1270
DQO mg/L	339	DQO mg/l	300

6.3 Potencial de hidrógeno pH

Una vez transcurrido el tiempo de residencia hidráulico del influente dentro de los reactores, se tomaron muestras y posteriormente se parametrizó el cambio del pH a la salida y se observó lo siguiente:

Al incidirse una corriente eléctrica el cambio del pH del influente es notable debido a que en su caracterización inicial denotaron valores de pH de 7.6. Una vez transcurrido el proceso el pH se desplazó al rango alcalino con valores promedio de 8 a 9.6, dependiendo del voltaje aplicado, véase Figura 18. La alcalinización es producida principalmente por los hidróxidos metálicos producidos por los electrodos de hierro y aluminio. Estos resultados se salen claramente de los parámetros estipulados por la “NOM-001-SEMARNAT-2021”, pero para esto se tiene considerado en la propuesta tecnológica de diseño, someter el efluente a otra sección de tratamiento terciario (Filtrado, dosificador, etc.) para estabilizar el pH del efluente con el fin de que cumpla con lo estipulado en dicha norma “NOM-001-SEMARNAT-2021”.

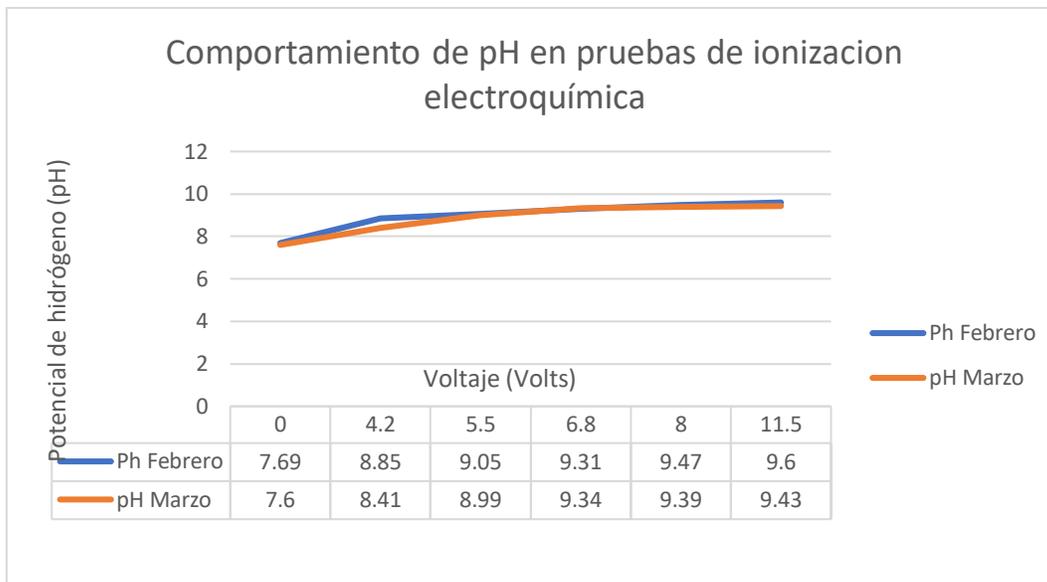


Figura 18. Comportamiento del pH en pruebas de ionización electroquímica. Corridas de febrero y marzo de 2023. Elaboración propia.

Dentro del reactor con electrodos de hierro, las moléculas desprendidas de este metal $Fe(s)$ en el reactor generan iones de hierro que durante el proceso forman moléculas de estructura amorfa, de carga positiva y de cualidades hidrofóbicas que se unen a las partículas orgánicas degradadas de carga negativa como lo son las moléculas del grupo hidroxilo HO^- y carboxilo $COOH$. Esto induce a la coagulación de estas partículas sólidas orgánicas e inorgánicas para formar flóculos que se adhieren a las moléculas de hidróxido de hierro $Fe(OH)_{3(s)}$ para posteriormente precipitar por diferencia de densidades y otras son elevadas a la superficie por las moléculas de oxígeno desprendidas durante la reacción electroquímica y flotan en la superficie del reactor en forma de lodos que se pueden separar del agua por medios físicos.

El mismo suceso ocurre en el reactor con electrodos de aluminio en el que varios mecanismos de interacción entre las moléculas orgánicas y los metales desprendidos mediante la hidrólisis, los cuales cambian el pH del medio desplazando lo a un nivel alcalino. La floculación y los flóculos tienen una gran área de superficie, la cual favorece la rápida absorción de los compuestos orgánicos y su posterior flotación y precipitación durante el proceso a partir de las moléculas de $Al(OH)_3$.

6.4 Color Aparente UPC

Con respecto a este parámetro, la remoción del color se observa en todas las corridas que la eliminación de color los reactores trabajando a un voltaje de 4.2 Volts, la remoción de turbidez es muy baja, sin embargo, ocurre descenso considerable de color y turbidez a partir de los 5.5 y 11.5 voltios lo que físicamente y puede observarse una reducción notable de turbidez en el agua, lo que indica la

eficiencia en el tratamiento del efluente. Además de que esto es un buen indicador con respecto a la remoción y depuración de los contaminantes del efluente mediante el proceso de ionización electroquímica, como lo muestra la Figura 19.

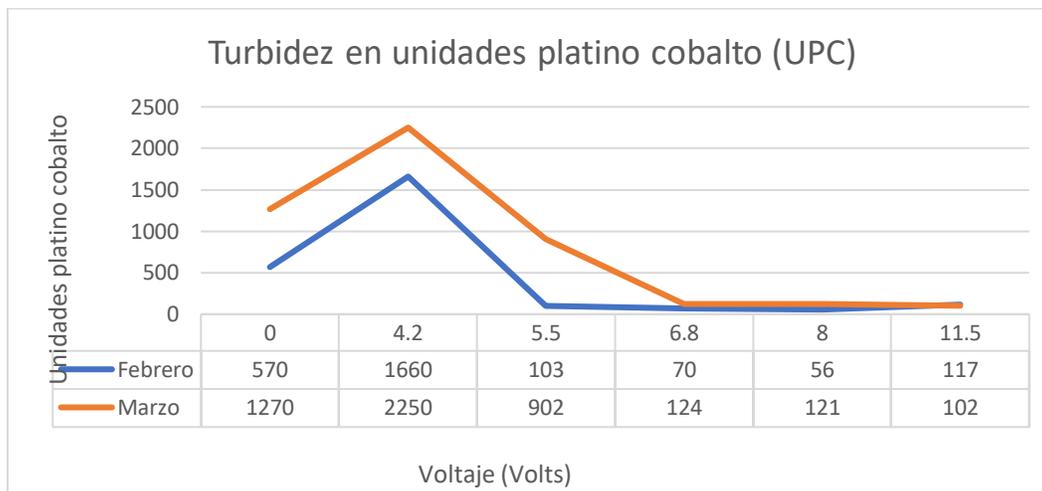


Figura 19. Reducción de turbidez con respecto a voltaje aplicado en pruebas de ionización electroquímica, febrero y marzo 2023. Elaboración propia.

Con este parámetro se realizaron gráficas en las que se muestra la eficiencia de remoción de color por los reactores con respecto al voltaje aplicado en cada corrida.

Lo que muestra una remoción considerable en los reactores al momento de eliminar la turbidez de los efluentes. Como se muestra en la Figura 20 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en las que se puede confirmar que la remoción de color es superior al 85% y este cumple con lo estipulado en la NOM-001- SEMARNAT-2021. En la que establece que en el efluente se debe de mostrar una pureza o en este caso una turbidez del 15%, el cual las corridas realizadas a un voltaje de 5.5 Volts en adelante, pueden remover con alta eficiencia la turbidez del influente.

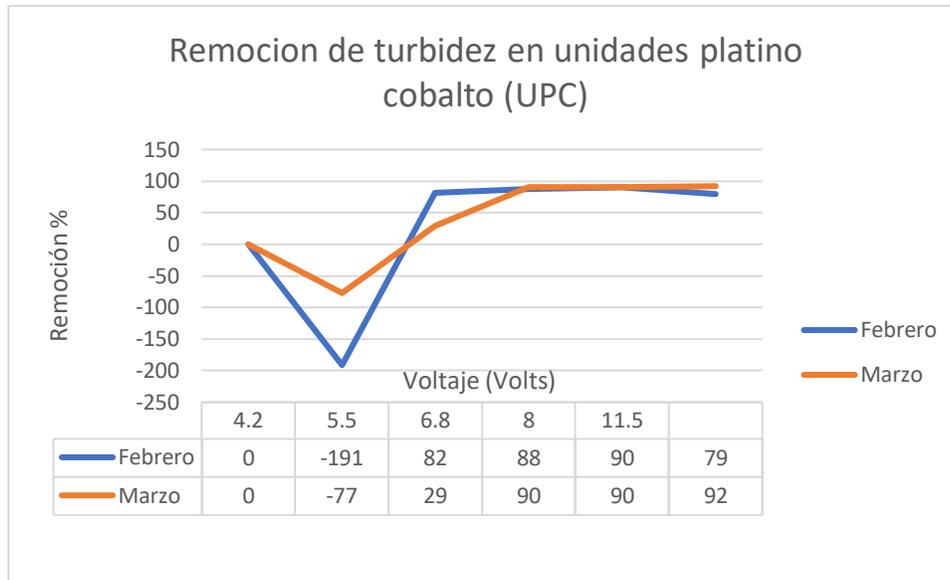


Figura 20. Eficiencia de remoción de color UPC febrero y marzo 2023. Elaboración propia.

6.5 Conductividad eléctrica del agua

Como tal en la NOM-001- SEMARNAT-2021 el parámetro de conductividad no requiere de la acreditación y aprobación de la entidad correspondiente, pero si la conductividad del agua presenta valores menores a $3500 \mu\text{s}$ la metodología de dicha norma marca que se reportan presencia de *E. Coli* y si en el parámetro de conductividad es mayor o igual a $3500 \mu\text{s}/\text{cm}$ se reporta presencia de *enterococos fecales*. Para el fin de esta investigación, el poder contabilizar y parametrizar la conductividad es de vital importancia, debido a que como el agua actúa como un electrolito durante el proceso y para el buen desempeño del proceso de ionización electroquímica favorece la conducción de la electricidad en el cual la remoción de los contaminantes es llevada a cabo como se muestra en la Figura 21.

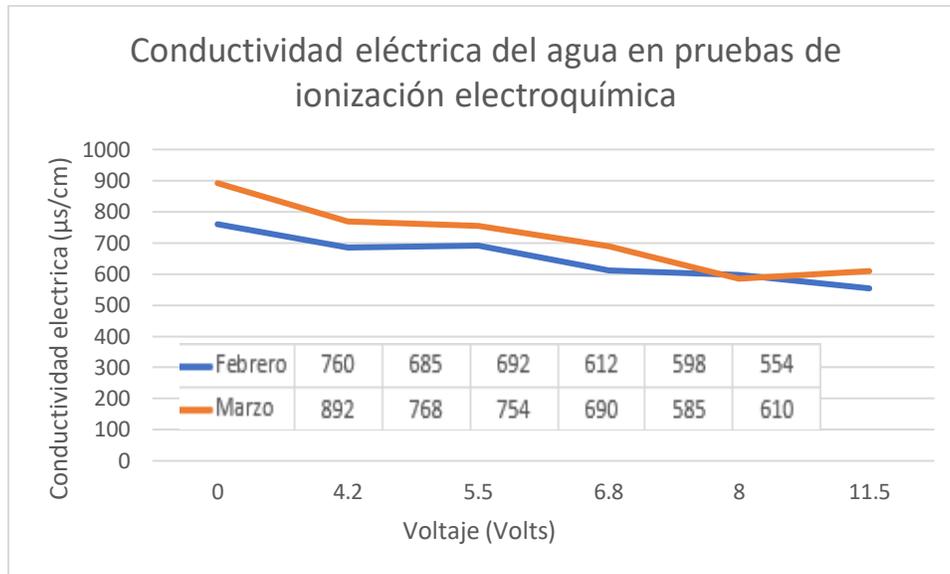


Figura 21. Conductividad del eléctrica agua en pruebas de ionización electroquímica febrero y marzo 2023. Elaboración propia.

Cabe resaltar que en la experimentación, mientras más alta sea la conductividad eléctrica del influente, mucho más eficiente será la remoción de contaminantes, de la observación experimental cabe resaltar que llega un momento en el que al aumentar el voltaje y el tiempo de residencia; todo parecería que aumentaría y eficiencia del proceso, pero ocurre todo lo contrario, la temperatura del agua aumenta debido a que los electrodos y el medio electrolítico funcionan como una resistencia eléctrica y esta desestabiliza los flóculos y la remoción de contaminantes no es llevada a cabo. Es de vital importancia el cuantificar este parámetro, así como el voltaje, amperaje y densidad de corriente debido a que estos parámetros que están estrechamente relacionados, para la correcta operación de los reactores y así mismo obtener buenos resultados en la experimentación.

6.6 Sólidos disueltos totales (SDT)

La concentración de sólidos disueltos en el efluente, si denotó un descenso que promedia entre el 16% y 35% y estos valores varían con respecto al voltaje aplicado y a la cantidad de sólidos disueltos presentes en el influente, que al igual con la conductividad de este. A continuación, se muestran la Figura 22 que muestran el porcentaje de remoción de sólidos disueltos y suspendidos.

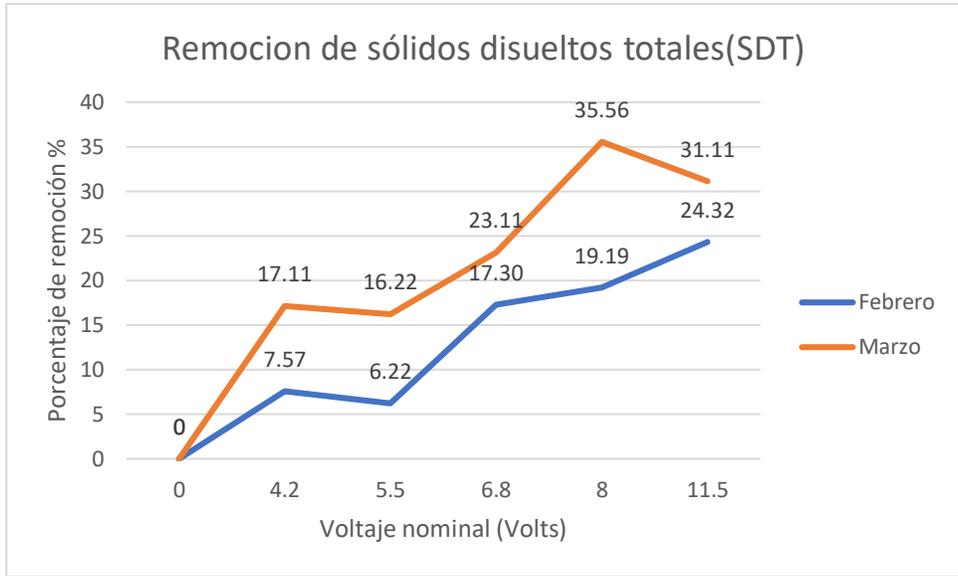


Figura 22. Remoción de sólidos disueltos totales en pruebas de ionización electroquímica en febrero y marzo 2023. Elaboración propia.

En la Figura 22 se observan diferentes porcentajes de remoción donde la mayor cantidad de remoción se observa entre los rangos de 6 a 11.5 voltios, a continuación, se muestran la Figura 23 se puede observar el valor numérico en partes mg/L obtenidos a la salida del proceso con el fin de caracterizar y comparar con los parámetros estipulados por la norma en la Tabla 1.

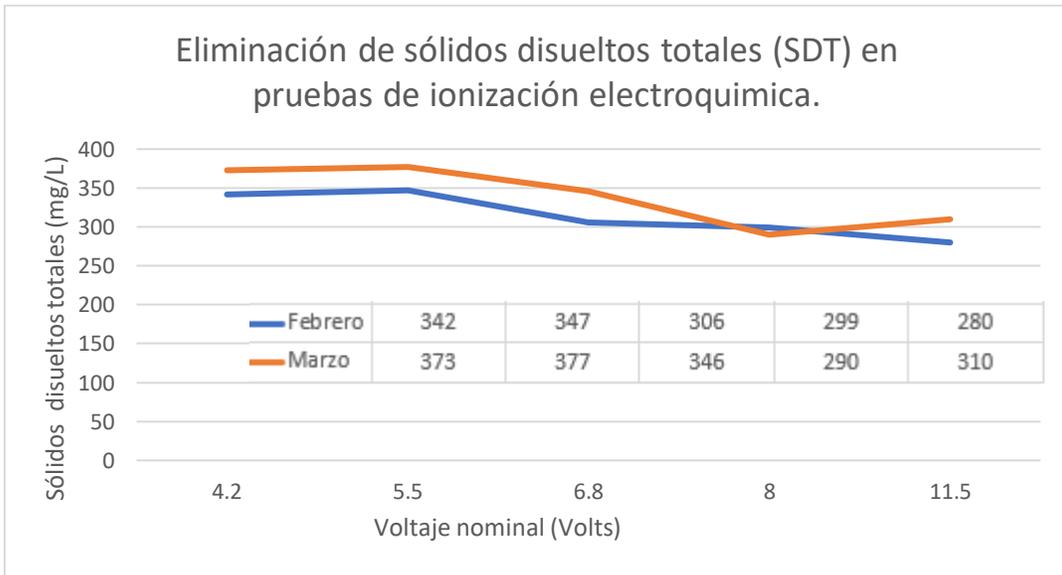


Figura 23. Eliminación de sólidos disueltos totales en pruebas de ionización electroquímica en febrero y marzo de 2023. Elaboración propia.

Los datos reportados anteriormente son de vital importancia observar y cuantificar debido a la relación que existe entre los sólidos disueltos totales (SDT) y la conductividad eléctrica del influente ya que este, ya que el influente de agua residual se comporta como un electrolito y este funge como medio en el que se lleva a cabo la degradación de los contaminantes a través del tratamiento electroquímico, de ahí la importancia de cuantificar estos parámetros no solo como parámetro guía que garantiza que el proceso electroquímico se ejecute de forma eficiente, además de que se puede observar de manera general la cantidad de contaminantes presentes en las aguas residuales. Al final la eliminación mayoritaria de estos sólidos disueltos y suspendidos se pueden retirar en una etapa secundaria posterior a partir de un proceso de separación mecánica o filtrado, con el fin de reducir la cantidad de partículas disueltas y suspendidas en el efluente. Lo cual representa un área de oportunidad en cuestión de diseño e implementación al momento de llevar a cabo la propuesta técnica de diseño que este trabajo sustenta.

6.7 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

El parámetro más importante en el que se enfocó este trabajo fue la determinación de materia orgánica medida como DQO. Con este parámetro se observa la eficiencia global de los reactores electroquímicos y qué tan recomendable sería el utilizar esta tecnología en términos de tratamiento de agua gris. En la Figura 24 y Figura 25 se observa que en los voltajes reportados se obtienen resultados con remociones de materia orgánica e inorgánica superiores al 75% sobre 339 y 300 mg/L de cada una de las corridas realizadas en el mes de febrero y marzo de 2023 que es el 100%, por lo que el caudal tratado, cumple lo propuesto en la hipótesis de este trabajo.

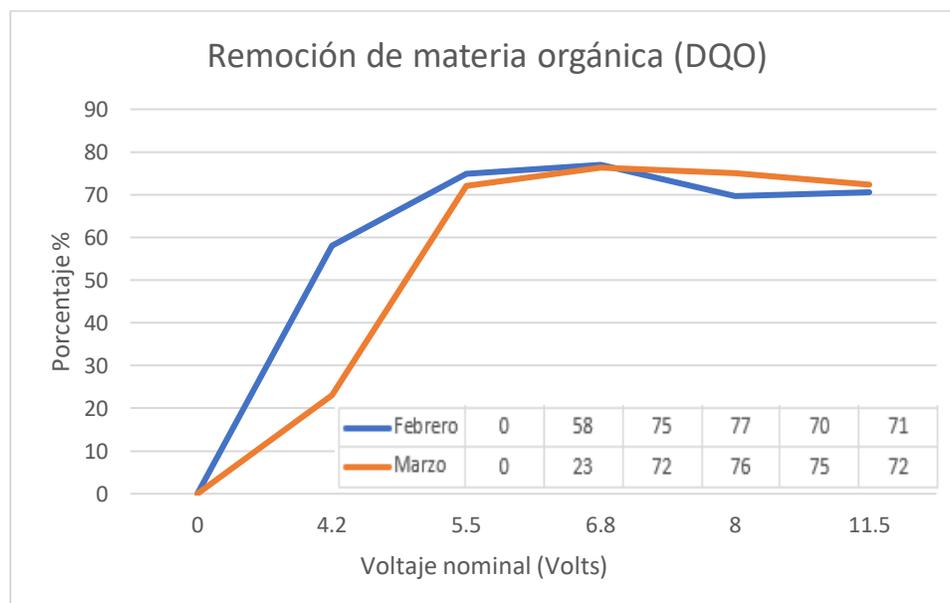


Figura 24. Remoción de materia orgánica en pruebas de ionización electroquímica en febrero y marzo 2023. Elaboración propia

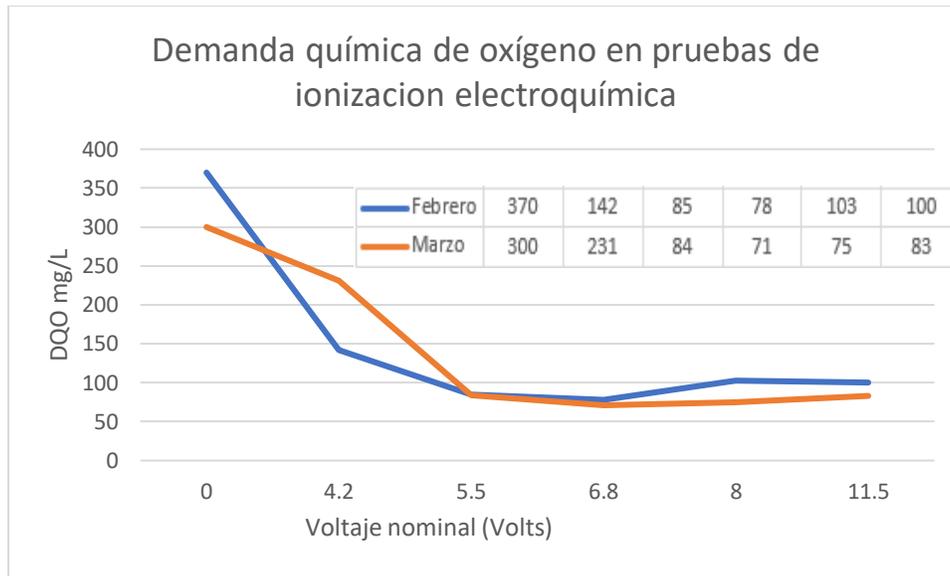


Figura 25. Demanda química de oxígeno en pruebas de ionización electroquímica febrero y marzo 2023. Elaboración propia.

En la Tabla 1 el parámetro de contaminantes disueltos medidos con la demanda química de oxígeno establece un rango de 60 a 210 mg/L. En este trabajo de experimentación, se obtuvieron resultados que oscilan entre 71 a 231 mg/L, donde la remoción varía con respecto al voltaje aplicado, pero en cualquiera de las pruebas realizadas sólo en los reactores con electrodos de hierro y aluminio, se cumple y se superan la mayoría de los parámetros que la NOM-001-SEMARNAT-2021 exige para la descarga de aguas residuales a cuerpos de agua propiedad de la nación y en la que esta experimentación denota resultados comprobables de que esta tecnología funciona, debido a su alta eficiencia de remoción de contaminantes para este caso de estudio (aguas grises).

7. Diseño conceptual de planta de tratamiento de aguas grises

Para este capítulo se presenta un diseño conceptual de una planta de tratamiento de aguas, en la que mantendremos como proceso de tratamiento principal a los reactores diseñados previamente (capítulo 4). Los reactores electroquímicos cuentan con una capacidad definida, flujo, dimensionamiento y una geometría ya probada, por lo que, a continuación, se muestra el diseño de los equipos de proceso que anteceden y posteriores a los reactores.

En las etapas previas y posteriores a los reactores electroquímicos se incluyen equipos de separación mecánica, equipos de almacenamiento, tubería e instrumentación. El objetivo de esto es presentar un proceso completo con la capacidad de tratar el influente de aguas grises acotado a este caso de estudio.

Para esta propuesta de diseño es necesario establecer y ubicar en un diagrama de bloques de proceso cada una de las etapas, en la cuales se enuncia cada una de las operaciones unitarias. Posteriormente se realizó un Diagrama de Flujo de proceso (DFP) y un diagrama de tubería e instrumentación (DTI).

En esta propuesta se incluyen algunos equipos diseñados específicamente para los caudales y volúmenes específicos de los reactores propuestos. Así mismo se consideran otros equipos de características comerciales que cumplen con las especificaciones y demandas del proceso.

A continuación, se muestra en la Figura 26 el diagrama de bloques en el que se incluyen las operaciones unitarias de la propuesta tecnológica.

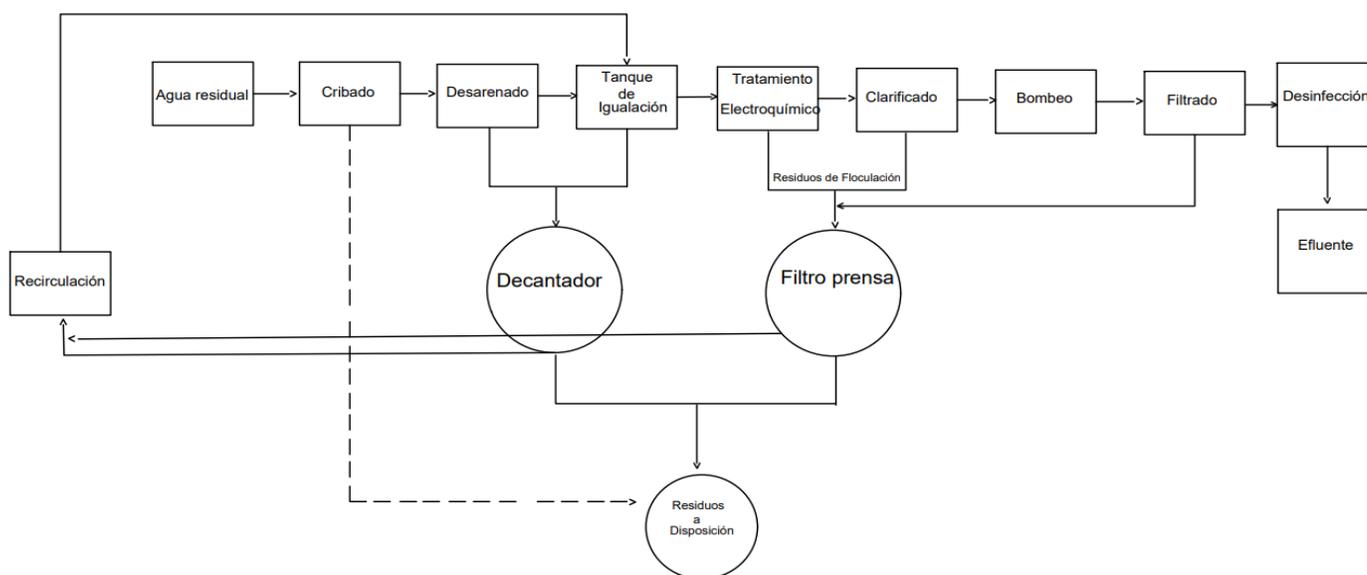


Figura 26. Diagrama de bloques para tren de tratamiento de aguas grises mediante ionización electroquímica. Elaboración propia 2023.

Los reactores con electrodos de hierro y aluminio tienen una capacidad de almacenamiento de 58.54 L y tratan caudales de 0.7, 1 1.5 y 2 L/min, por lo que se deben diseñar los equipos de pretratamiento y tratamiento terciario con la capacidad de operar y almacenar dichos caudales.

7.1 Bases de diseño y control

-Se presenta una lista de las etapas de proceso diseñadas preliminarmente apegándose a los criterios de diseño consultados en la bibliografía.

1 cribado.

2 desarenado

3 tanque de igualación

4 tratamiento electroquímico

5 clarificado

6 bombeo

7 filtrado

8 desinfección

9 recirculación

10 disposición de residuos

- Se desea tratar la mayor cantidad de agua residual “aguas grises” con el objetivo de que el efluente cumpla con algunos parámetros requeridos por la NOM-01-SEMARNAT-2021 (DQO, SDT, pH, Conductividad eléctrica, turbidez y temperatura).

-Proponer un proceso eficiente e innovador para el tratamiento de aguas residuales.

-Instrumentar de la mejor manera posible este proceso de manera en la que se pueda automatizar la mayor parte de los equipos de proceso.

-Que la propuesta de proceso presente una alternativa a las plantas de tratamiento de aguas convencionales.

-Generar la menor cantidad de residuos contaminantes.

7.2 Descripción de proceso

Mediante un proceso relativamente sencillo, se espera obtener un agua tratada que cumpla con algunos de los parámetros especificados en la NOM-01-SEMARNAT-2021, a partir de la entrada de un influente de agua residual “aguas grises”. En primer lugar, se plantea un tren de separación mecánica para evitar que las tuberías, válvulas y demás equipos de proceso se vean obstruidos por los sólidos presentes

en el influente. Esta etapa incluye un cribado que eliminará los sólidos mayores a 2 cm y posteriormente un equipo de desarenado elimina el 90% de los sólidos sedimentables de 2cm a 0.2 mm de diámetro.

Una vez cumplida la primera etapa de separación de sólidos sedimentables, se integra un tanque de igualación, en el cual se da seguimiento y modifican parámetros como la conductividad eléctrica, pH y temperatura del influente con el objetivo de homogenizar estas características para que ingrese de manera estable a la siguiente etapa del proceso.

El influente entrará a un tratamiento electroquímico, en el cual mediante la técnica de ionización electroquímica se removerán y degradarán la mayoría de los contaminantes presentes en el agua. El tratamiento electroquímico se compone de dos reactores con electrodos de hierro y aluminio.

El agua procedente de este proceso será almacenado y tratado en un clarificador en el cual, se parametrizarán con equipos de medición de pH y conductividad eléctrica. En el cual una vez parametrizado, un dosificador químico se encarga de cambiar el pH del agua debido a que en la etapa de tratamiento electroquímico se generan iones OH los cuales desplazan el pH del agua a un nivel alcalino, el cual, por criterios de norma, no se puede disponer a cuerpos de agua a propiedad de la nación, por lo que la tarea del dosificador químico y el clarificador son regular el pH a un pH neutro.

Un equipo de bombeo enviará y hará pasar el influente por un filtro de lecho profundo, el cual eliminará los sólidos suspendidos en el agua. Posteriormente, en un tanque se almacenará el agua proveniente del proceso y se integrará a la etapa de desinfección por cloro, suministrado por un dosificador químico de hipoclorito de sodio. Terminando este proceso, el efluente se podrá disponer en cuerpos de agua propiedad de la nación o en su defecto ser almacenado para su posterior disposición, como en el caso de riego.

Cabe resaltar que este proceso se ha diseñado con recuperación de agua y disposición de residuos generados por los procesos de sedimentación, ionización electroquímica, separación mecánica y filtración. El agua recuperada se enviará de nuevo al proceso para que se reincorpore al tratamiento.

La separación de los sólidos consiste en un decantador que estará interconectado con los drenes del cribado, desarenado y el primer tanque de igualación. El decantador consta de un tren de 3 mallas tipo Tyler cuya función principal será retener los sólidos sedimentables y recuperar un porcentaje del agua remanente en estos procesos.

Como segundo equipo de separación se integra un filtro prensa que estará interconectado al tren de tratamiento electroquímico y clarificado y filtrado

multietapa. El objetivo del clarificador y filtro prensa es separar el agua de los lodos ligeros y pesados desprendidos de dichos equipos de proceso.

Previo a el diseño de los equipos, se presenta el diagrama de flujo de proceso “DFP” que muestra las etapas que engloban todo el proceso, como se muestra en la Figura 27.

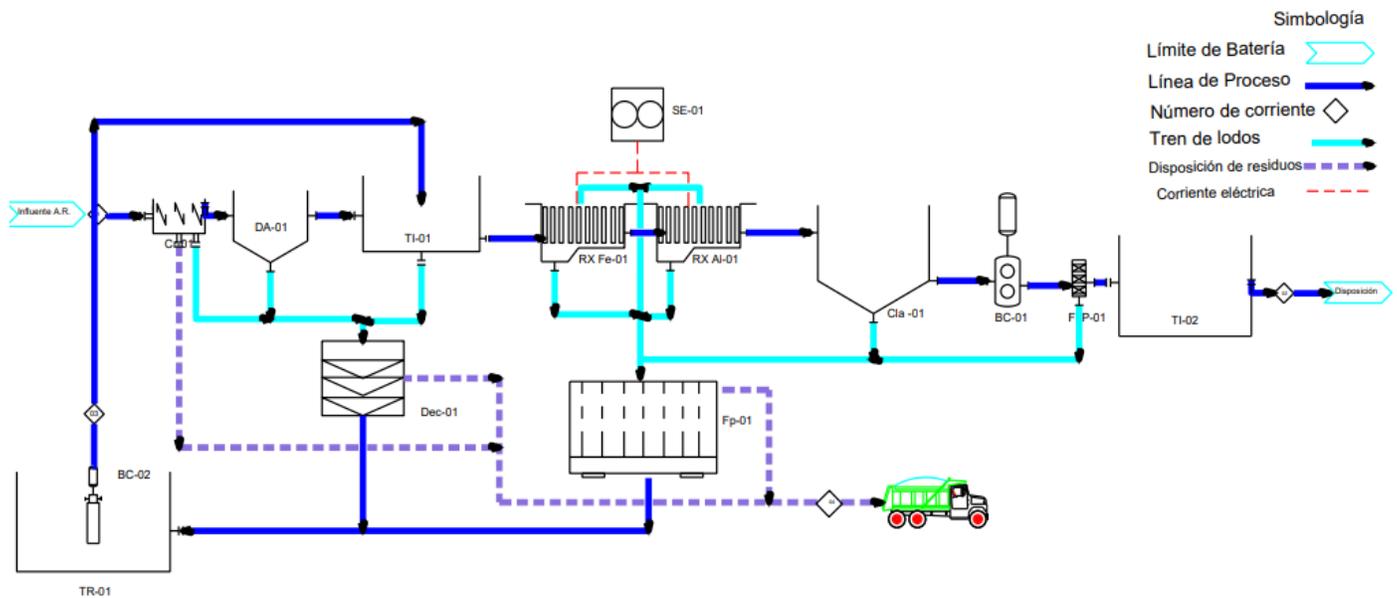


Figura 27. Diagrama de flujo de proceso de planta de ionización electroquímica. Elaboración propia 2023

7.3 Lista de equipos de proceso

Tabla 13. Listado de equipos de proceso. Elaboración propia

CLAVE	EQUIPO
Cr-01	CRIBADO
DA-01	DESARENADOR
TI-01,02	TANQUE DE IGUALACIÓN
RX-Fe-01	REACTOR DE HIERRO
RX-Al-01	REACTOR DE ALUMINIO
TR-01	TANQUE DE RECIRCULACIÓN
FLP-01	FILTRO DE LECHO PROFUNDO
SE-01	SUMINISTRO ELÉCTRICO
Cla-01	CLARIFICADOR
BC-01,02	BOMBA CENTRIFUGA
DEC-01	DECANTADOR
Fp-01	FILTRO PRENSA
XY-02	DESINFECCIÓN

7.4 Flujo de operación

El cálculo de los equipos, durante el diseño, se realizó considerando un flujo máximo de 2 L/min. Este flujo equivale a 3000 L de agua tratada por día. Por otro lado, mediante la experimentación continua en los reactores prototipo se determinó que el flujo de operación óptimo para este proceso es de 1 L/min, el cual muestra una mejor remoción de contaminantes. Lo anterior conduce al cumplimiento de uno de los objetivos de este proyecto que fue demostrar que el proceso de ionización electroquímica propuesto es capaz de eliminar hasta un 75% de contaminantes presentes en la muestra de aguas residuales aguas grises considerando la presencia de materia orgánica (DQO) de hasta 310 mg/L.

Tabla 14. Corrientes de proceso. Elaboración propia

		Corriente 1 (Influente)	Corriente 2 (Efluente)	Corriente 3 (Recirculación)	Corriente 4 (Lodos)
Parámetro	Unidades				
Flujo	L/min	1	1	0.05	1.25(kg/día)
Conductividad	µs/cm	892	554	Ver nota*	NA
pH	0 a 14	7.68	7	9.4 a 9.6	NA
SDT	Mg/L	450	290	Ver nota*	NA
Temperatura	°C	13.4	18	18	NA
Color	UPC	1270	56	NA	NA
DQO	mg/L	339	71	Ver nota*	NA

*Nota: Para efectos de la experimentación no se incluían la corriente de recirculación y de lodos, sin embargo, para una futura investigación, así como para el balance de masa se tendrían que considerar los valores de sólidos disueltos y de DQO que se incorporan en esta corriente.

7.4.1 Cribado Cr-01

Estableciendo como inicio del pretratamiento un tren de cribado, véase Figura 28, en el cual se diseña un equipo de separación mecánica con la capacidad de retener sólidos y contaminantes en el agua mayores a 2 cm , los cuales podrían interferir de manera significativa el tránsito del influente en las siguientes etapas de proceso. de la siguiente manera:

Se delimitan los caudales de manera en que se ajusten a la capacidad máxima de los reactores previamente diseñados a la capacidad hidráulica máxima de estos, el cual es de 2 L/min.

Los parámetros de diseño y caracterización de influente fueron tomados de lo establecido por (Tchobanglous et al., 2003).

Caudal (Q)	0.033L/s
separación de barras	1.27cm
Grado de inclinación	0.5°
Espesor de la barra (s)	0.2cm

Ancho de canal (b)	20 cm
Velocidad máxima del agua (VM)	1 m/s
Velocidad mínima del agua (Vm)	0.7 m/s

1-Determinar Área del canal (A)

$$A = \frac{Q}{VM} = \frac{0.00003 \text{ m}^3/\text{seg}}{1 \text{ m/s}} = 0.000033 \text{ m}^2$$

2-Determinar altura o tirante de agua (h).

$$h = \frac{A}{b} = \frac{0.000033 \text{ m}^2}{0.2 \text{ m}} = 0.000165 \text{ m}$$

3-Determinar separación entre rejillas (BG).

$$bg = \left(\frac{b - e}{s + e} + 1 \right) (e) = \left(\frac{0.2 \text{ m} - 0.0127 \text{ m}}{0.002 \text{ m} + 0.0127} + 1 \right) (0.0127) = 0.1745 \text{ m}$$

4-Área entre las rejillas (AE).

$$H = \frac{h}{\sin \theta} = \frac{0.000165 \text{ m}}{\sin 60^\circ} = 0.0001905 \text{ m}$$

$$AE = H * BG = \frac{0.0001905 \text{ m}}{0.1745 \text{ m}} = 3.325 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

5-Velocidad entre rejillas (Ve).

$$V = \frac{Q}{AE} = \frac{0.000033 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{3.325 \times 10^{-5} \text{ m}^2} = 0.9924 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

6-Número de barras (n).

$$n = \frac{BG}{e} - 1 = \frac{0.1745 \text{ m}}{0.0127 \text{ m}} = 12.7 \approx 13 \text{ barras}$$

7-Perdidas de carga (Hf).

$$Hf = \left(\frac{1}{0.7} \right) \left(\frac{Ve^2 - Vm^2}{2g^2} \right) = \left(\frac{1}{0.7} \right) \left(\frac{0.99 \frac{\text{m}^2}{\text{Seg}} - 0.7 \frac{\text{m}^2}{\text{Seg}}}{2 * 9.81 \frac{\text{m}^{(2)}}{\text{Seg}}} \right) = 0.0036 \text{ m}$$

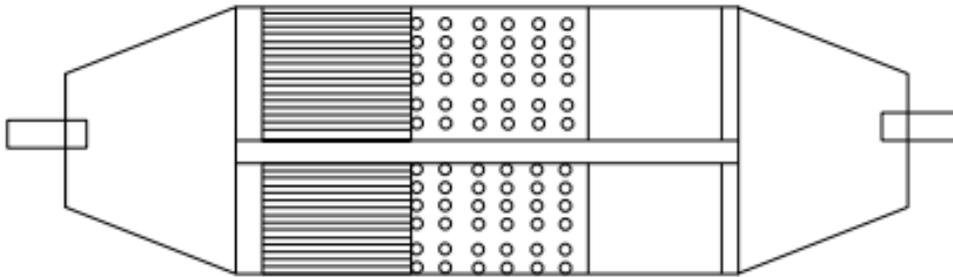


Figura 28. Cribado y configuración de tren de rejillas de influente.
Elaboración propia 2023.

7.4.2 Desarenado DA-01

El proceso de desarenado es otra etapa importante, véase Figura 29 , debido a que en este se eliminan los sólidos de diámetro de partícula superiores a 0.2mm, para evitar que dentro de las tuberías se generen incrustaciones de estos sólidos y materia no soluble:

1-Cálculo de área del canal(A).

$$A = \frac{Q}{Va} = \frac{0.000033 \frac{m^3}{Seg}}{1 \frac{m}{Seg}} = 0.000033 m^2$$

2-Cálculo de Ancho de los canales(b).

$$b = \sqrt{\frac{A}{1.5}} = \sqrt{\frac{0.000033 m^2}{1.5}} = 0.004690416 m$$

3-Cálculo de Altura(h).

$$h = 1.5 * b = 1.5 * 0.004690 = 0.007035624 m$$

4-Cálculo de tiempo de residencia(tr).

$$tr = \frac{h}{Vel Sedimentacion} = \frac{0.007035624 m}{0.019 \frac{m}{Seg}} = 0.370 seg$$

5-Longitud del canal (Lc).

$$L = tr * Vel\ agua = 0.370\text{seg} * 1 \frac{m}{\text{Seg}} = 0.37\ m$$

6-Factor de sobre diseño 25% (Lf).

$$L = Lc * 1.25 = 0.37 * 1.25 = 0.46\ m$$

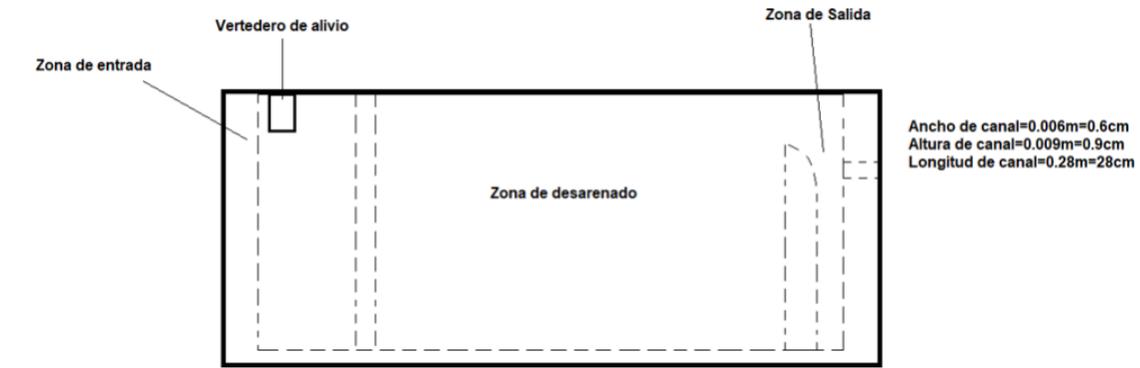


Figura 29. Desarenador horizontal (corte frontal).Elaboración propia

7.4.3 Tanque de igualación Ti-01 y Ti-02

Partimos de un tanque de geometría en prisma rectangular, el cual se diseñó con la capacidad de 3 m³ para que pueda cumplir con la demanda de flujo de los reactores a su capacidad mínima, media y máxima, como se observa en la Figura 30.

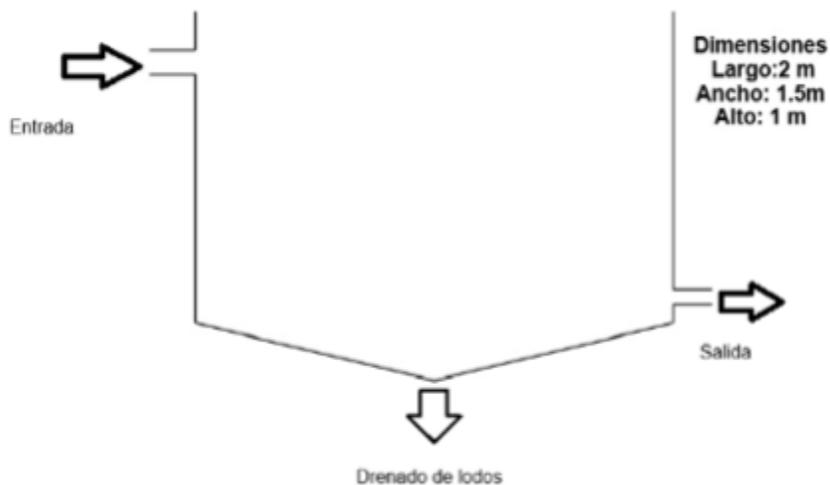


Figura 30. Tanque de igualación Ti-01 y Ti-02. Elaboracion propia.

Cálculo de volumen de tanque de igualación: Para este diseño partimos de una geometría y diseño preliminar solo considerando el volumen necesario para contener el influente, debido a que, para esta propuesta, se descartan diseños

específicos de ingeniería como lo son el grosor de las paredes del tanque y los materiales con los que se planea construir.

$$V = \text{Largo} * \text{Ancho} * \text{Alto}$$

$$V = 2 \text{ m} * 1.5 \text{ m} * 1 \text{ m} = 3 \text{ m}^3$$

7.4.4 Clarificador Cla-01

Este clarificador cuenta con un volumen de 3 m³ y tiene como función homogenizar el efluente, debido a que el agua procedente del proceso de ionización electroquímica contiene un pH básico, por lo cual es de vital importancia regularlo a un rango neutro “pH 7” para que este cumpla con el rango aceptable a los criterios de la NOM-01-SEMARNAT-2021 como se observa en la Figura 31. Además, que, en este equipo se logran separar los remanentes de los lodos que posiblemente puedan traspasar los drenes de lodos en los reactores de ionización electroquímica. Para su posterior recuperación y disposición de los lodos en equipos de separación posteriores.

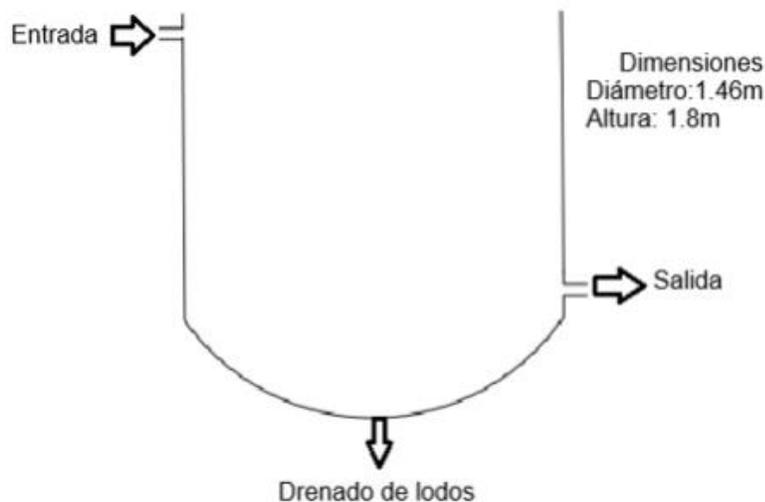


Figura 31. Clarificador Cla-01. Elaboración propia

$$V = \pi * r^2 * h$$

$$V = 3.1416 * 0.73^2 \text{ m} * 1.8 \text{ m} = 3.01 \text{ m}^3$$

7.4.5 Bomba centrífuga BC-01 y BC-02

Para criterios de selección de estos equipos de bombeo se toman en cuenta equipos de 1 caballo de fuerza “1 HP” con la capacidad de bombear hasta 475l/min cuyas bombas se accionarán por comando del PLC y las señales enviadas por los sensores de nivel. En la Figura 32 se muestran los diagramas de dichas bombas, considerando a BC-01 que pueda transportar el influente del Clarificador “Cla-01” a el filtro multietapa o lecho profundo “FLP-01” y el equipo BC-02 esté presente en el

tanque de recirculación en el cual se recuperará el agua proveniente de los lodos remanentes de los reactores de ionización electroquímica “RX Fe-01 y RX Al-01”y el clarificador “Cla-01”, así mismo como el agua con sólidos provenientes de los drenes del tren de pretratamiento como lo son el cribado “Cr-01” desarenador “DA-01” y el tanque de igualación “TI-01”. Con el fin de reciclar la mayor cantidad de agua en el proceso.

Estas bombas centrífugas funcionarán de manera intermitente, dependiendo del momento en que estas sean activadas por los equipos de control automatizados “PLC’s, Indicadores de nivel y manómetros “

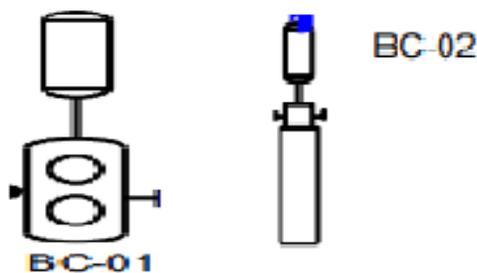


Figura 32. Bomba centrífuga “BC-01 y “BC-02” .Elaboración propia.

7.4.6 Filtro de lecho profundo FLP-01 (Filtro multimedia)

Con el objetivo de retener las bacterias, metales pesados, sedimentos y sólidos suspendidos en el influente, se decidió seleccionar un filtro multimedia con el cual se cumpla con los criterios de remoción de contaminantes a la salida del proceso, como se muestran en la Figura 33.

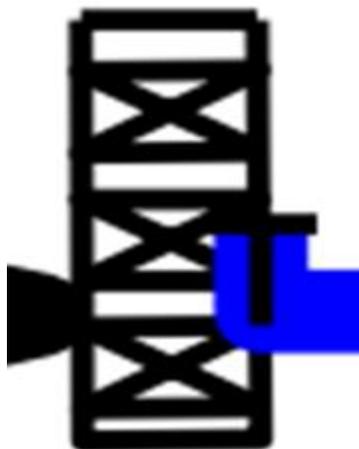


Figura 33. Filtro de lecho profundo “FC-01”. Elaboración propia.

El filtro de lecho profundo (filtro multimedia) se selecciona con respecto a los criterios planteados anteriormente de un flujo máximo y por fines prácticos el volumen de este será de 0.021 m^3 con una cama de arena y antracita, como se muestra en la Figura 33.

7.4.7 Recirculación y disposición de residuos

Para este proceso se tienen diseñados dos equipos de separación mecánica. Una vez calculando los equipos de pretratamiento del influente, es recomendable seleccionar o en su caso diseñar un tanque de igualación, en el cual se almacenará el influente y así mismo, se le suministrará un volumen de agua constante a los reactores de ionización electroquímica.

7.4.8 Tanque de recirculación TR-01

Como principal equipo en el proceso de recirculación y recuperación de influente, se selecciona un tanque de almacenamiento con geometría de prisma rectangular con capacidad de 3 m^3 con el objetivo de que este pueda almacenar y suministrar suficiente agua, para posteriormente ser reincorporada a el proceso principal y tratar la mayor cantidad de agua posible. Como se observa en la Figura 34.

Calculo para diseño del tanque de recirculación.

$$V = \text{Largo} \times \text{Ancho} \times \text{Alto}$$

$$V = 2 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 1 \text{ m} = 3 \text{ m}^3$$

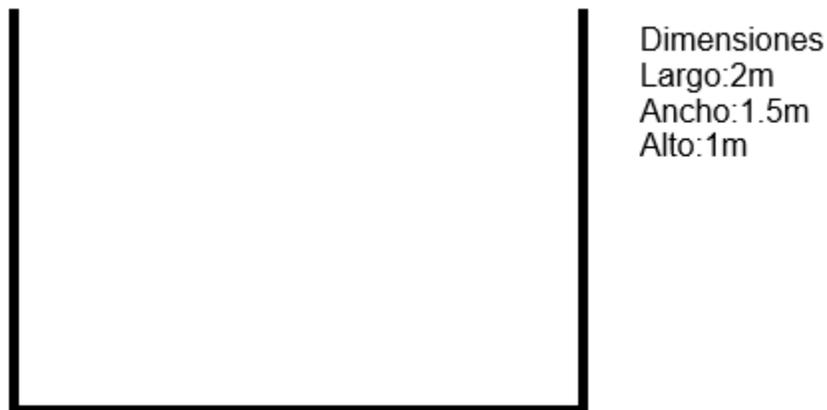


Figura 34. Tanque de recirculación “TR-01” .Elaboración propia

7.4.9 Decantador “Dec-01”

El decantador se encargará de separar los sólidos sedimentables que puedan quedar remanentes del proceso de cribado “Cr-01”, desarenado “DA-01” y tanque de igualación “TI-01”. A partir de tres mallas tipo Tyler que se encuentran en manera ordenada de diámetro de poro mayor a el menor, en el primer módulo una malla de

No.10, segundo módulo de No. 35 y el tercero de No. 230. Cada uno con la capacidad de retener sólidos de 2.00mm, 0.500mm y 0.063 mm.

Para este equipo de separación mecánica se parte del diseño de un tanque de geometría tipo prisma rectangular, la única diferencia con los demás tanques de almacenamiento son las mallas Tyler que se le implementan. Como lo muestra la Figura 35.

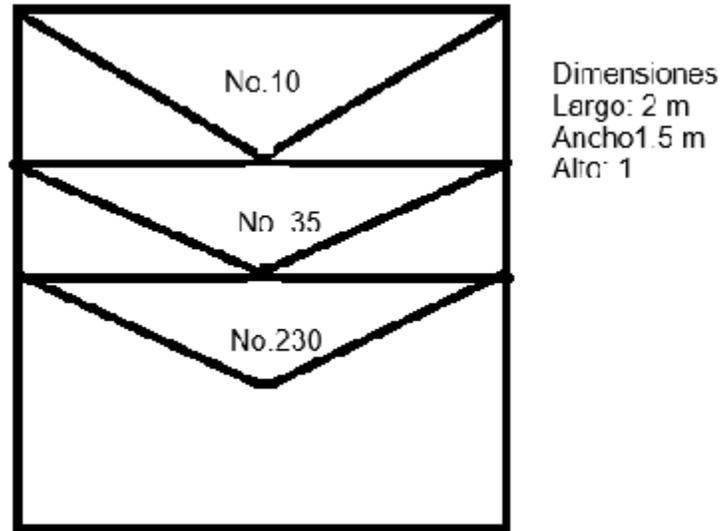


Figura 35. Decantador “Dec-01”. Elaboración propia.

Cálculo para diseño de Decantador.

$$V=Largo \times Ancho \times Alto$$

$$V=2m \times 1.5 m \times 1m= 3 m^3$$

7.4.10 Filtro prensa “Fp-01”

El filtro prensa como se muestra en la Figura 36, cumplirá con la función de separar las natas y flóculos procedentes de los reactores “RX-Fe-01, RX-Al-01”, el clarificador “Cla-01” y el filtro multietapa “FLP-01”. La suspensión entra por un extremo del equipo, donde se encuentra un conjunto de placas y marcos, de forma longitudinal la suspensión se adhiere a dichos marcos y una vez compactados, los sólidos se depositan en las caras cubiertas de la tela de las placas y el agua recuperada desciende por las canaladuras de las placas y esta será mandada a el tanque de recirculación.

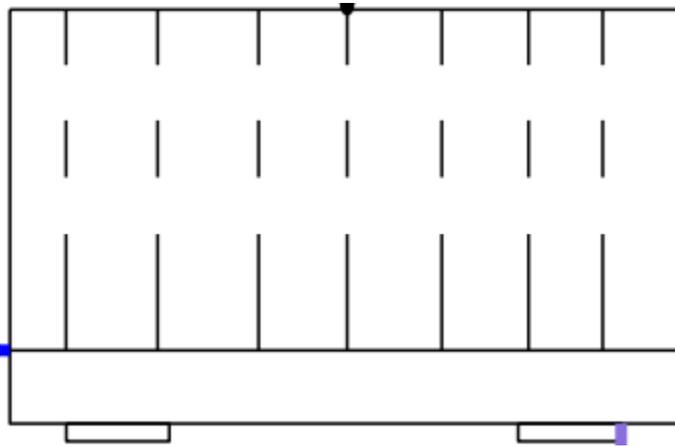


Figura 36. Filtro prensa “Fp-01”. Elaboración propia.

Como criterio de selección para este equipo se parte de los catálogos de filtros existentes en el mercado. De acuerdo con la cantidad de lodos que se producen en los procesos de floculación se aproxima el 5% del volumen de agua son los lodos ligeros y sedimentables, esta masa engloba un valor de 150 kg de lodos a base húmeda para un máximo de 3m³, que es el máximo volumen de agua que se puede tratar en la planta por día.

Una vez recuperado el agua, en el filtro prensa se queda compactados la masa seca de los lodos, lo que es un peso de 2.5 kg. Que es lo máximo que se produciría al día trabajando a la máxima capacidad de operación de la planta.

Por lo cual en la Tabla 15 se muestran los filtros prensa y el número de placas necesarias para llevar a cabo la separación de los lodos.

Tabla 15. Catálogo de Filtros prensa. *TORO Waste Water Equipment 2020.*

No. Placas	No. Cámaras	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Altura (cm)	Peso en vacío (kg)	Peso en carga (kg)	Volumen Torta(m ²)	Tamaño de placas y Telas
5	4	1.455	1.16	1.39	660	688	21	470
10	9	2.33	1.16	1.39	860	860	47	470
15	14	3.17	1.16	1.39	940	1035	73	470

Por lo que cualquiera de los filtros prensa reportados en la Tabla 15 cumplen con los criterios y necesidades del proceso, para poder separar los lodos y recuperar la mayor cantidad de agua.

7.5 Filosofía de operación

7.5.1 Arranque.

Nota. Manualmente se abre la válvula reguladora de flujo VR-001 que se encuentra previo a la entrada de agua del reactor electroquímico RX Fe-01 con el flujo adecuado de agua a tratar “0.7, 1 ,1.5 y 2 L/min”.

- a) Ingresa el influente por la tubería y este será medido con un totalizador de flujo FQ-01, al mismo tiempo el PLC realiza la apertura de todas las válvulas solenoides XV-1 hasta XV-7.

7.5.2 Operación Normal

- b) El influente entra a la primera etapa del proceso, la cual es el cribado en el equipo Cr-01 donde se removerán los posibles sólidos de mayor tamaño, donde dichas rejillas de cribado pueden retener sólidos de 2cm de diámetro.
- c) La tercera etapa es el desarenado con el equipo DA-01, donde el agua suministrada ya ha pasado por el cribado separará las partículas sedimentables inferiores de 2 cm hasta 2mm.
- d) Enseguida se almacenará el influente en un tanque de igualación TI-01 en los que se encuentran 3 equipos de medición que constan de un medidor de nivel LI-01, medidor de conductividad eléctrica AT-01, y un medidor de pH AI-01 cuyo objetivo es el parametrizar el influente y estabilizar el nivel de agua necesario para la siguiente etapa de proceso, así mismo se encuentra un dosificador químico XY-1, que con base a el pH parametrizado, dosificará una corriente de hipoclorito o hidróxido de sodio que regulará el pH a una escala neutra “pH7”. Todo esto siendo controlado mediante las señales de entrada y salida del PLC-1.
- e) La siguiente etapa es el tratamiento electroquímico en los reactores de hierro y aluminio RX Fe-01 y RX Al-01, donde se lleva a cabo la remoción de contaminantes del agua y dichos contaminantes precipitan al fondo de los reactores y otros flotan en la superficie del agua. Este tren de tratamiento cuenta con un medidor de temperatura TT-01 que estará monitoreando el aumento de esta, que al mismo tiempo si aumenta 5°C por encima de la temperatura ambiente, enviará una señal de alarma a el operador y el PLC-01 enviará una señal al relé R-01 que automáticamente hará el cambio de polaridad de los electrodos. Dicho relé con fines prácticos en el proceso realizará el cambio de polaridad en un lapso de 15 minutos, con el fin de evitar el pasivamiento de los electrodos en el caso de que la temperatura aumente, también se enviará una señal desde el sensor de temperatura al PLC y donde el operador también deberá verificar que la temperatura en los reactores descienda o se iguale a la temperatura ambiente.
- f) El agua entra a la etapa de clarificado Cla-01 en la cual el nivel de agua será monitoreado LI-2, de manera que este no exceda los 3000 litros y el pH es parametrizado nuevamente AI-02 y cuenta con un dosificador químico XY-2 que en este caso dosificará una carga de hipoclorito que regulará el pH a una

escala neutra “pH7”. Todo esto controlado por las señales de entrada y salida del PLC-1.

- g) La válvula solenoide XV-5 se abre dando entrada al influente a la bomba centrífuga “BC-01” la cual transportará el agua hacia el filtro multietapa “FLP-01” el cual eliminará los sólidos suspendidos que pueden estar presentes en el agua. Dentro de este tren de tratamiento se encuentra un manómetro PI-01 que estará monitoreando la presión de entrada del filtro, con el fin de que este no se colmate y sufra daños. Este enviará una señal de alarma A-01 al PLC-1 si en la entrada del filtro se registran presiones inferiores a 30psi o superen la presión máxima de operación del filtro que es de 100 psi el cual cerrará la válvula solenoide XY-7 e indicará al operador que realice el cambio de filtro multi etapa.
- h) Al abrirse la válvula solenoide XV-7 el agua procedente de “FLP-01” es almacenada en el tanque de igualación TI-02, donde entra a una etapa de desinfección con cloro XY-03, se almacena el influente y dispone el influente para la última etapa del proceso.
- i) Por último, con ayuda de un totalizador de flujo se cuantifica la cantidad de agua que se ha tratado en el proceso de ionización electroquímica, para su posterior disposición o almacenamiento.
Nota. A continuación, se describe el proceso de recirculación, recuperación de agua y disposición de residuos.
- j) El proceso se diseñó con el objetivo de obtener la mayor cantidad de agua tratada en un lapso de operación de 24 hrs. El tren de tratamiento desde el cribado Cr-01, desarenador DA-01 y el tanque de igualación TI-01 cada uno cuenta con un dren de desagüe, en donde se interconectan y se controla mediante una válvula solenoide XV-4 que manda los sólidos sedimentables y una porción de agua hacia un Decantador Dec-01 y un totalizador de flujo FQ-3 que interconectado con la válvula solenoide XV-4 al momento de enviar un volumen de 150 litros de agua, esta cerrará el flujo en automático. Todo esto controlado por el PLC-1.
- k) Entre los reactores RX Fe-01 y RX Al-01 y el clarificador Cla-01 se les diseño al igual que el desarenador DA-01 y el tanque de igualación TI-01 un dren de purgado y en el caso de los reactores una mampara que recolectará los lodos flotantes. Todos estos serán enviados a un filtro prensa Fp-01 que separará los lodos del agua. Siguiendo el mismo esquema de operación mencionada en el inciso j. En el que un totalizador de flujo FQ-4 y una válvula solenoide XV-6.
- l) El agua recuperada de estos dos trenes de separación mecánica será enviada a un tanque de almacenamiento de 3000 litros de capacidad TR-01. Que cuenta con un equipo de medición de nivel LI-4 que esta interconectado a una bomba centrífuga BC-02 operado por el PLC-1 que reintegrará el agua al proceso. Siendo esta recibida por el desarenador DA-01.

El tren de tubería que transportará el agua procedente del tanque de recirculación a él desarenador cuenta con una válvula *check* VC-001, la cual evitará que el agua regrese al tanque de recirculación.

- m) Por último los residuos provenientes del decantador Dec-01 y el filtro prensa FP-01 serán enviados al tren de desechos.

7.5.3 Paro normal

Nota. El paro normal de la planta de proceso será indicado al momento en que se haya cumplido el objetivo de tratar el volumen de agua planeado o en su defecto para realizar labores de limpieza o mantenimiento preventivo a los equipos.

- a) Se suspenderá la alimentación de agua residual y este indicado por el operador al PLC-01.
- b) Este enviará las señales de salida a todos los equipos conectados a estos y cerrará válvulas solenoides para así cerrar y confinar cada una de las etapas de proceso.
- c) El paro normal es relativamente sencillo y no involucra un riesgo para los equipos ni para el operador.

7.5.4 Paro de emergencia

Durante el proceso podrían suceder diferentes circunstancias que puedan comprometer la seguridad del proceso, equipos o del operador, por lo cual se debe tener una estrategia que permita solucionarlas o mitigarlas.

1. Sobrealimentación: Esto puede ocurrir si hay un desborde en los niveles de alguno de los tanques de almacenamiento o clarificado, que cuentan con un nivel máximo de 3000 litros. Lo que indicará al PLC-1 y al operador que el excedente de agua se podrá enviar de emergencia a el tanque de recirculación TR-01 por medio de la interconexión que existe entre el dren de cada uno de los equipos de recuperación de agua. El cual cuenta con un volumen de almacenamiento similar al de los equipos de proceso principales.
2. Apagón inesperado. En este caso, el sistema cuenta con todo un tren de válvulas solenoides del tipo "NA" que significa válvulas normalmente abiertas. Las cuales, al momento de ya no recibir un flujo electromagnético, estas se cerrarán en automático, lo cual permite que cada uno de los equipos involucrados en el sistema queden confinados y ninguno este operando. Ayudando al proceso a mantenerse en un estado de reposo, hasta que regrese la corriente eléctrica.

7.6 Diagrama de tubería e instrumentación DTI

A continuación se muestra el diagrama de tubería e instrumentación, en la que se encuentran todos los equipos de proceso e instrumentos de medición "Relevadores, válvulas, sensores, etc." en los que ya se encuentra descrita la filosofía de operación y características generales de puesta en marcha, apagado normal, apagado de emergencia y listado de los equipos de instrumentación presentes en el proceso, véase en la Figura 37.

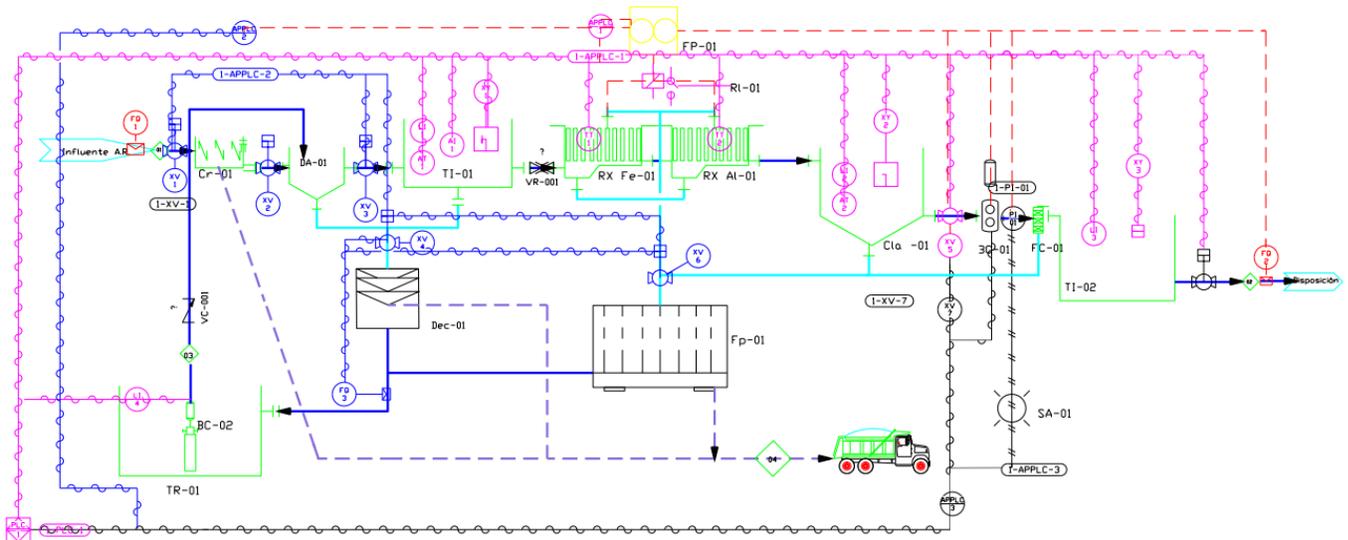


Figura 37. Diagrama de Tubería e instrumentación. Elaboración propia 2023.

7.6.1 Lista de instrumentos

CLAVE	EQUIPO
FQ	Medidor de flujo
XV	Válvula solenoide
LI	Indicador de nivel
VC	Válvula check
AT	Medidor de conductividad eléctrica
AI	Indicador de pH
XY	Dosificador químico
APPLC	Acceso primario de control lógico programable
PLC	Control lógico programable
PI	Manómetro
TT	Sensor de temperatura
RL	Relevador

7.6.2 Diámetro de tuberías

Se toma como criterio de selección el catálogo ya comercial véase Figura 38 para determinar de diámetro de las tuberías. Al final se consideró una tubería con un diámetro de 25”mm debido a que este diámetro y los flujos que maneja, son los adecuados para esta propuesta de proceso.

Diámetro interior del tubo de cobre en mm	Velocidad 1.50 Metros por segundo	Caudal máximo en m3/s	Caudal máximo en m3/h	Flujo máximo en l/min	Flujo máximo en l/s
10	1.50	0,000118	0,4241	7,069	0,118
12	1.50	0,000170	0,6107	10,179	0,170
14	1.50	0,000231	0,8313	13,854	0,231
16	1.50	0,000302	1,0857	18,096	0,302
20	1.50	0,000471	1,6965	28,274	0,471
26	1.50	0,000796	2,8670	47,784	0,796
30	1.50	0,001060	3,8170	63,617	1,060
33	1.50	0,001283	4,6186	76,977	1,283
38	1.50	0,001701	6,1242	102,070	1,701
40	1.50	0,001885	6,7858	113,097	1,885

Figura 38. Diámetro de tuberías y caudal máximo de operación. *Biopur habitat 2021*.

En el diagrama de tubería e Instrumentación se encuentra contenida una gran cantidad de información del proceso, ya que en este se lleva a cabo una base de diseño conceptual de ingeniería para así asegurar que los equipos de proceso estén integrados a un lazo de control que tenga la capacidad de amortiguar, contener o distribuir los picos de concentración de influente. Estos lazos de control contienen los datos e información precisa para que el proceso se lleve a cabo de manera segura y normal.

Las bases y criterios de diseño son indispensables para la elaboración de un DTI, por ejemplo, el DFP sirvió de guía para la elaboración del DTI, ya que para la elaboración del DFP se engloba una descripción detallada del proceso y de sus equipos presentes.

Al comenzar a describir la filosofía de operación es necesario que los diagramas contengan todas las líneas y equipos necesarios para la correcta operación del proceso. Para la elaboración de los diagramas se ha considerado y descrito ciertas directrices para el arranque y operación del proceso, posibles fallas y formas de contener dichas fallas y evitar malfuncionamiento de los equipos de proceso o de cualquiera de los instrumentos presentes en la línea de proceso.

8. Discusión de resultados

Uno de los objetivos de este trabajo es presentar datos que denoten que dicha propuesta tecnológica tiene viabilidad y que cuenta con ventajas y beneficios como son la eficiencia de la tecnología de ionización electroquímica y su capacidad para remover un alto porcentaje de contaminantes presentes en el agua, así mismo sus beneficios ambientales y un análisis de los datos generados experimentalmente más la propuesta de proceso y los equipos diseñados en el capítulo anterior se presentan como evidencia de la factibilidad de la tecnología. A continuación, se muestra, en la Tabla 16, de manera general, las bondades de la implementación de esta tecnología, así como sus posibles desventajas.

Tabla 16. Ventajas y desventajas de la implementación de la ionización electroquímica 2023. Elaboración propia.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">-Podría reducir los costos de operación en comparación con el proceso de coagulación química.-No es necesario utilizar reactivos para el proceso.- Es adaptable a procesos de energías alternativas y renovables (eólica, solar, mareomotriz, fotovoltaica).-Presenta un área de investigación con resultados favorables y posibles áreas de mejora.-Genera lodos más compactos y esto facilita la disposición de los residuos.-Los flóculos son mucho más estables, en comparación con el método de coagulación química.-Al incidirse la corriente eléctrica se incita a una mayor excitación molecular, lo que favorece la coagulación de los contaminantes.	<ul style="list-style-type: none">-Es necesario reponer los electrodos de sacrificio.-Altas concentraciones del electrodo de sacrificio (hidróxido de hierro e hidróxido de aluminio en los lodos.- En regiones donde el costo de la energía es alto, esto puede ser una desventaja para el proceso.-En los electrodos se llega a formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo su eficiencia.--Es necesario implementar más áreas de investigación, para corroborar la viabilidad de la tecnología.- Puede existir cierta desconfianza en la viabilidad de este proceso, debido a que no se ha implementado este proceso en casos reales y comprobables de su eficiencia. A diferencia de las tecnologías que utilizan reactores bioquímicos (Lodos

<ul style="list-style-type: none"> - El influente a tratar contiene una mayor cantidad de sólidos disueltos, lo que facilita el tratamiento de los efluentes. - El área de operación es menor y más compacto en cuestión de infraestructura y construcción, la cual puede crecer modularmente según las demandas hídricas del proceso. 	<p>activados, RAFA, coagulación química, etc).</p>
--	--

8.1 Discusión de resultados de la experimentación

Los resultados obtenidos en la experimentación denotan la viabilidad del proceso y que dicha tecnología es capaz de remover hasta el 75% (influyente con hasta 339 mg C/L) de los contaminantes del influente en un tiempo de 20 minutos. Donde los resultados generados por la prueba de la DQO indican que el influente caracterizado con concentraciones entre 300 y 339 mg/L, al salir del reactor alcanzaron valores de hasta 71 mg/L. En su mayoría se obtuvieron resultados que cumplen con lo indicado en la norma en cuestión de DQO. Con base en lo anterior se concluye que la calidad del efluente y la implementación de la tecnología de ionización electroquímica cumple con este parámetro, que como indicador de calidad de agua engloba la cantidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos degradados en un efluente. En el experimento realizado una variable modificada durante el proceso fue el voltaje de operación, en donde no precisamente a mayor voltaje se presentaron mejores porcentajes de remoción.

La mayoría de los resultados obtenidos en cada una de las corridas experimentales dentro de los reactores cumple con el criterio de DQO de la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021. Toda la información generada en la experimentación con los electrodos de hierro y aluminio se encuentra en el capítulo 6, pero a continuación se muestra un breve análisis de los resultados obtenidos en la experimentación con cada una de las pruebas de DQO, pH, conductividad eléctrica, SDT y color aparente.

Demanda química de oxígeno

Este parámetro es de vital importancia, debido a que esta se puede considerar como uno de los parámetros guía para poder hacer un barrido general de la calidad a la salida del proceso. Su importancia radica en que en ella se cuantifica la cantidad de materia orgánica e inorgánica degradada durante el tratamiento del influente y en este trabajo de investigación se comprobó la eficiencia de la implementación del tratamiento electroquímico para tratar aguas residuales (aguas grises) y en ella se

puede presentar una propuesta de diseño que se acopla y cumple con los criterios estipulados en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Potencial de hidrógeno pH

Las pruebas realizadas con diferentes voltajes mostraron un incremento en general de este parámetro, obteniendo un efluente con un medio alcalino. Lo anterior se debe a que este es un proceso de hidrólisis. Dentro de los reactores, las moléculas liberadas por los electrodos de hierro y aluminio producen hidróxidos metálicos de carga positiva que se unen a las moléculas inorgánicas y orgánicas de carga negativa, las cuales alcalinizan en agua hasta los rangos de 8 a 9.4. Esto indica el buen funcionamiento de los reactores de ionización electroquímica, los cuales al formar estas moléculas del ion hidroxilo y carboxilo, ambas con propiedades hidrofóbicas que favorecen la separación por diferencia de densidades de los lodos generados en dicho proceso. Estos lodos contienen la mayoría de los contaminantes del influente y son de fácil separación por algún medio mecánico.

Conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales

La conductividad eléctrica fue uno de los parámetros más importantes durante el proceso experimental, debido a que el influente es el que se comporta como un electrolito. Esto quiere decir que este es el medio por el cual la corriente eléctrica se transfiere de los electrodos al medio acuoso y se genera la degradación de las moléculas contaminantes. El máximo nivel de conductividad en el influente registro valores de 892 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y se logró reducir hasta un valor de 554 $\mu\text{s}/\text{cm}$, que indica un descenso considerable en la conductividad del agua, debido a que, durante el proceso, ciertas moléculas disueltas en el influente han sido degradadas, entre ellas sales minerales y surfactantes en su mayoría.

Esto quiere decir que mientras más alta sea la conductividad eléctrica y mayor tiempo de residencia tenga el influente se presenta una mayor remoción de los contaminantes. Los resultados experimentales han mostrado que al aumentar la resistencia eléctrica del electrolito y al no haber una superficie de intercambio de temperatura, los electrodos se pasivan y hay un aumento de temperatura en los reactores, lo que dispara el amperaje, por ende, aumenta el calor dentro de los reactores. Este fenómeno desestabiliza los flóculos generados por el reactor y estos vuelvan a contaminar el influente.

Por estas razones es de vital importancia que exista un tiempo de residencia hidráulico que permita un ingreso constante del influente en los reactores y una continua observación de parámetros como el voltaje y la intensidad de corriente eléctrica. Además, un intercambio constante de la polaridad de los electrodos, cada 15-20 minutos, evita este fenómeno de desestabilización de los flóculos y se garantiza una remoción eficiente de los contaminantes del agua.

Sólidos disueltos totales

Debido a que la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos en el influente denotan la presencia de sales y surfactantes presentes en el agua, con la cualidad de solubilizarse de mejor manera en el influente al momento de presentarse un aumento de temperatura en los reactores, estos no son fáciles de degradar por el proceso de ionización electroquímica, por lo que es de vital importancia que se tenga a consideración estos fenómenos.

La cantidad de sólidos disueltos presentes en el influente presentan valores de 450mg/L y se logró reducir hasta niveles de 280mg/L, sin embargo, esto implica que en el proceso se tenga considerada una etapa de filtrado multi etapa el cual elimine estos contaminantes. El cual se tuvo considerado para la propuesta de diseño.

Color aparente

El parámetro de color aparente es de vital importancia debido a que indica la remoción de turbidez del agua. Como se ha comprobado experimentalmente en los reactores, la remoción de turbidez es eficiente, obteniendo remociones de un 85%. Debido a que la mayoría de los contaminantes presentes en el influente es de composición orgánica; éstos son fácilmente degradables en los reactores electroquímicos.

Se concluye con respecto a la información generada, que la mayoría de los parámetros cuantificados en la salida de los reactores representan un cambio significativo en comparación con las características iniciales del efluente. Se observa entonces, una mejora en los parámetros medidos y que pasaron por el proceso.

9. Análisis de la propuesta de diseño

Dicha propuesta de diseño engloba un trabajo de ingeniería conceptual e ingeniería básica en la que se tienen considerados y diseñados equipos de separación mecánica, pretratamiento, tratamiento terciario y recirculación que complementarán la labor de los reactores, al momento de degradar molecularmente los contaminantes del influente y adecuar el efluente a los criterios de norma.

El cual se diseñó con el propósito de hacer más eficiente el proceso y tener el menor gasto energético en los equipos y así mismo obtener el mayor volumen de influente tratado en la salida del proceso.

Tren de cribado Cr-01 y Desarenado DA-01

Con el objetivo de evitar que en toda la corriente de proceso se contamine con la presencia de sólidos que se pueden incrustar en las tuberías e incluso afectar el desempeño de alguno de los equipos de proceso. Se diseñó un equipo de cribado el cual consta de un tren de rejillas que separará los sólidos menores a 2 cm de grosor, con el objetivo de evitar que sólidos de tamaño considerable colmaten las tuberías y entradas o salidas de proceso.

El desarenador se diseñó con el objetivo de complementar la tarea de separación de sólidos de las rejillas de cribado y separar los sólidos presentes en el influente de 2cm hasta un límite de 0.2mm, de grosor, los cuales pueden llegar a incrustar en las tuberías o equipo de válvulas, que puede impedir el desempeño eficiente de los demás equipos de proceso.

Considerando para dicha propuesta de diseño, que este proceso sea robusto y escalable para poder tratar no solo aguas grises, sino que también aguas residuales del tipo comercial o incluso tipo industrial.

Tanque de igualación TI-01

El diseño de un este tanque de igualación tiene como propósito el poder amortiguar y homogenizar la carga de influente para su posterior etapa de proceso. Es importante que en este tanque de igualación se haga un monitoreo de variables como lo son la conductividad del influente y el pH, para que posteriormente dentro de este sistema el dosificador químico establezca el pH a una escala neutra debido a que, si el influente ingresa a la posterior etapa, la cual es el tratamiento electroquímico, presentará problemas en el desempeño de los reactores.

Dichos problemas pueden ser que, al momento de ingresar una carga con mayor acidez o alcalinidad, los electrodos se degraden con mayor velocidad debido al ambiente químico que presenta estar en un medio alcalino o un medio ácido y al momento de llevarse a cabo el proceso de ionización electroquímica, los

contaminantes presentes no sean degradados en su totalidad, lo cual compromete la eficiencia del proceso, mantenimiento y operación.

De ahí radica la importancia de tener un equipo de proceso que se encargue de la homogenización y amortiguación del influente. Garantizando la operación óptima de los demás equipos de proceso posteriores a esta etapa.

Tratamiento electroquímico RX Fe-01 y RX Al-01

Esta es la etapa más importante debido a que en esta se lleva a cabo la ionización electroquímica, donde los reactores de hierro y aluminio desempeñan una tarea importante, la cual es degradar los contaminantes presentes en el agua. Dicho proceso es altamente eficiente al momento de llevar a cabo la remoción de los contaminantes. Sin embargo, se ha observado que este proceso requiere de cierto cuidado al momento de que se inicia el proceso, debido a que la temperatura puede aumentar en los equipos, debido al pasivamiento de los electrodos, a los tiempos de residencia superiores a los estipulados en este trabajo de investigación y a la resistencia eléctrica del electrolito. Dichos factores pueden llegar a generar alteraciones al proceso. Estas variables, se han considerado desde la etapa de experimentación y en el diseño de esta propuesta tecnológica, donde los reactores se diseñaron contando con sensores de temperatura, tiempos de residencia bien calculados y sobre todo con un equipo eléctrico que realizara el cambio de polaridad de los electrodos, para evitar el fenómeno de pasivamente.

Garantizando que la operación de estos equipos sea eficiente, cumpla con el objetivo con el que fue diseñado y garantice el uso eficiente de la energía eléctrica.

Clarificador Cla-01

Después del tratamiento electroquímico el influente adquiere características alcalinas, lo cual para criterios de NOM-001-SEMARNAT-2021 se debe caracterizar el pH a una escala neutra, por el cual se diseñó un clarificador el cual cuenta con equipos de monitoreo de pH y de un dosificador químico que en automático igualará el pH para acoplar el efluente a lo especificado por la norma.

Tanque de igualación TI-02

El objetivo del tanque de igualación es recibir la carga del influente para distribuirlo a la última etapa del proceso. En esta etapa el influente se encuentra con la mayoría de los parámetros de DQO, conductividad y color acoplados a lo estipulado en la norma.

Bombeo BC-01 y filtrado FC-01

Para esta etapa, el agua contenida en el tanque de igualación TI-02 será bombeada a un filtro de lecho profundo que eliminará la mayoría de los sólidos disueltos en el agua, para así poder disponerse el efluente con las características y parámetros de DQO, conductividad, SDT, color y pH.

Recirculación y disposición de residuos.

El sistema está diseñado para que, en ciertas etapas de proceso, se pueda re disponer el influente a un tanque de almacenamiento y separar los residuos del agua, para su posterior disposición.

Los equipos de desarenado DA-01 y el tanque de igualación TI-01 cuentan con un dren que se encargará de recuperar el agua de los fondos de estos equipos, que en su mayoría contienen sólidos sedimentables procedentes de la etapa de cribado y desarenado. Se está considerando como una etapa de separación de sólidos y recuperación de la base húmeda. Donde un decantador "Dec-01" diseñado con mallas tipo Tyler de diferente diámetro de partícula, separan los sólidos del agua.

El segundo equipo de recuperación de agua y separación de residuos está conectado a los equipos de tratamiento electroquímico "RX Fe-01 RX-Al-01" y clarificador "Cla-01". Los reactores están diseñados para poder drenar los lodos sedimentables y los lodos suspendidos generados del proceso electroquímico, al igual el clarificador se diseñó con el objetivo de drenar los lodos sedimentables que se puedan desplazar a través del movimiento del fluido entre las tuberías de salida de los reactores.

Estos lodos serán transportados a un filtro prensa Fp-01 que, por medio de separación mecánica, el agua se dispondrá a un tanque de almacenamiento y los lodos restantes, serán enviados a disposición de residuos.

Tanque de recirculación TR-01

El tanque de recirculación se diseñó con el objetivo de captar el agua procedente de los equipos de separación mecánica y posteriormente reintegrar esta agua a la corriente de proceso principal. Así obteniendo la mayor eficiencia del proceso y de tratamiento del agua residual.

10. Beneficios sociales y ambientales

En esta sección se discuten las posibles ventanas de oportunidad de esta tecnología y de la propuesta tecnológica, orientada al impacto social y al impacto ambiental que esta tecnología podría aportar. Ya que estas dos vertientes comparten beneficios en común, el cual es presentar alternativas que mejoren la calidad de vida de una región en particular ya sea en su ambiente social, salud, alimentación y calidad de vida. Así como mitigar los daños al medio ambiente en el que se engloban temas como lo son la contaminación de los suelos, contaminación de la atmósfera y obviamente contaminación del agua.

10.1 Beneficios sociales

-No solo en México, sino en muchos lugares del mundo, el agua es un bien escaso donde el tratamiento y reutilización de aguas residuales presentaría una solución a sus problemas de escasez.

-Disponer de un agua de calidad en zonas de riego, donde el agua con la que se riega los cultivos a veces no cuenta con la mejor calidad, lo que compromete la producción y calidad de los alimentos que consume una región.

- Una vez tratada el agua no solo puede ser utilizada para el riego de zonas agrícolas, sino que puede presentar una alternativa a su uso para fines recreativos o incluso agua para procesos industriales.

- Presentar una alternativa viable en el reciclado de aguas residuales con el objetivo de velar por la salud de la población y garantizar que el acceso al agua sea constante y de calidad.

-A medida que las urbes sigan creciendo y desarrollándose, se deben de aplicar tecnologías como la que sustenta este trabajo de investigación, con el objetivo de presentar una tecnología eficiente de tratamiento de aguas y se definan estrategias para que el desarrollo humano y urbano no presenten dificultades en cuestión del manejo y reutilización de recursos hídricos y se centre en la recuperación máxima del agua.

-Fomentar el cuidado del agua y así mismo del suelo, que son de vital importancia para que el ciclo del agua no se vea afectado por las actividades humanas.

-La tecnología fomenta a que se le pierda ese escepticismo de la sociedad con respecto a el agua tratada.

10.2 Beneficios ambientales

-La tecnología y el proceso propuesto en este trabajo de investigación se alinean a ciertos criterios establecidos en la NOM-001-SEMARNAT 2021.

-Presenta una alternativa a las tecnologías convencionales para el tratamiento de aguas residuales.

-Presenta una robusta capacidad de operación y de tratamiento no solo de aguas grises, sino que puede ajustarse a aguas del tipo comercial o industriales, véase Anexo V.

-Asegurar que el agua tratada pueda ser regresada a cuerpos de agua sin ningún contaminante que pueda dañar el ecosistema. Tomando en cuenta toda la flora y fauna que dependan de ella.

-En términos de descarga a suelos cársticos, los resultados experimentales indican que la calidad del agua no presentaría ningún daño al suelo y permite su posterior depósito a cuerpos subterráneos de agua sin presentar alguna alteración a su composición y a la estabilidad física del cuerpo de agua.

- Presentaría una alternativa a el agua de riego de zonas agrícolas y dicha alternativa puede reducir de sobremanera cualquier contaminante del suelo, que presente deterioro en la cantidad de nutrientes que aporta la tierra.

10.3 Beneficios económicos

-El costo para tratar 1 m³ de agua residual podría ser mucho menor que el de las tecnologías convencionales (Reactores biológicos) véase Anexo VI.

-El hecho de que esta tecnología sea tan eficiente para remover contaminantes presentes en el agua residual, no significa que tenga costos tan altos para mantener la operación y tratar cualquier agua residual.

-Las tecnologías convencionales se verán rebasadas con respecto a la eficiencia energética, que al final se resume a dinero, puede ser reducido aún más si a este proceso de ionización electroquímica se integra a fuentes de suministro eléctrico renovable (energía fotovoltaica, energía eólica, energía hidroeléctrica, etc.). Lo cual significa un ahorro económico mayor y un menor impacto ambiental.

11. Conclusiones y perspectivas a futuro

Las tecnologías orientadas al tratamiento de aguas residuales obedecen a uno de los retos que hoy enfrenta el mundo entero de tener una mejor calidad del agua tratada. Esto implica una labor que engloba desde la implementación de normas para el tratamiento hasta la disposición del recurso hídrico. Todo esto regulado por los gobiernos y respaldado por la evidencia científica. Así se condiciona a las empresas y a la sociedad en general, al cumplimiento de estas normas en razón del beneficio social, ambiental y económico.

Esto presenta no solo un gran reto en el que no solo el gobierno es el único que debe brindar una solución a esta problemática, donde se debe incluir a cualquier organización, cualquiera que sea el sector en el que se desempeña y que estas adopten y/o generen tecnologías para hacer frente a la problemática de la contaminación del agua y medio ambiente. Estandarizando practicas obligatorias para el tratamiento y descarga de sus efluentes.

Del desarrollo experimental se determina que, en términos energéticos, esta tecnología presenta una “relativa limitante”, debido a que es necesario suministrar una corriente eléctrica constante para su funcionamiento. Además, si la zona geográfica en donde se ubique la tecnología experimenta escasez constante de energía eléctrica, esto impediría el desempeño adecuado de esta tecnología. Por otro lado, es importante considerar que la demanda energética del proceso no es tan alta como en los procesos convencionales y que puede integrarse a fuentes de energía alternativa como la solar, eólica, hidráulica o fotovoltaica, facilitando su aplicación.

En esta fase de investigación y desarrollo es posible determinar la efectividad de la tecnología propuesta. Lo anterior, en función de sus ventajas con respecto a las tecnologías convencionales para el tratamiento de aguas residuales. Con los resultados generados en la experimentación fue posible generar una propuesta de diseño para una futura implementación de esta tecnología, no solo a nivel prototipo, sino que es posible afirmar, respaldado en la evidencia científica en que se puede construir e implementar un proceso funcional, eficiente, sustentable y confiable para el tratamiento de aguas residuales.

El objetivo principal de este trabajo se ha cumplió satisfactoriamente obteniendo resultados de remoción de materia orgánica (DQO) superiores al 75% (310 mg C/L). Además, se ha establecido este trabajo como punto de partida para trabajos de investigación posteriores para profundizar en los rubros no explorados durante el desarrollo de este trabajo de investigación, como lo fueron el análisis de los residuos generados en el tratamiento electroquímico, la implementación de electrodos de diferente composición y la geometría de los reactores electroquímicos. Por otra parte, durante la investigación realizada y en los análisis de los equipos de proceso involucrados en esta propuesta, se encontraron áreas de mejora y de estudio para este proceso, como el análisis y caracterización de los residuos (lodos) puestos

solamente a disposición, en ellos se podría encontrar un valor agregado al proceso. Así mismo aportaría valor, contar con una caracterización química y biológica de este desecho (lodos) para encontrar nuevas áreas de mejora en el tratamiento electroquímico y presentar un beneficio todavía mayor.

Se sugiere explorar más a detalle formas para mejorar energéticamente este proceso, considerando la posibilidad de que este proceso se conecte a fuentes de suministro de energía renovable y así mitigar los impactos ambientales en una hipotética puesta en marcha de una planta de tratamiento de aguas con esta tecnología.

Se sugiere explorar e investigar cada uno de los factores involucrados en la toma de decisiones para la puesta en marcha de una planta con esta tecnología. Para que dichas propuestas y avances futuros aporten una mejora es importante que el gobierno, instituciones internacionales especializadas al cuidado y protección del medio ambiente y empresas definan metodologías y normas que permitan mitigar, controlar y contrarrestar los daños al medio ambiente.

Se sugiere que se sancione a las empresas y municipios que no se hagan responsables de la disposición adecuada de sus residuos y que esta misma se incentive la generación de nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas y residuos que presenten beneficios sociales y ambientales, como la que este trabajo sustenta.

Para que dichas propuestas, trabajos y avances futuros orientados al desarrollo y mejora de esta tecnología es importante que el gobierno, instituciones internacionales especializadas al cuidado y protección del medio ambiente y empresas definan metodologías y parámetros para la institución de más normas que permitan mitigar, controlar y contrarrestar los daños al medio ambiente. Donde se sugiere que exista un órgano gubernamental que se dedique a sancionar de forma considerable a las empresas que no se hagan responsables de la disposición adecuada de sus residuos y que esta misma institución incentive la generación de nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas y residuos que presenten beneficios sociales y ambientales, como la que este trabajo sustenta.

Finalmente es importante definir los mecanismos de acción para normar y mitigar el impacto ambiental de las actividades humanas, lo cual implica evitar normas “hechas a modo” entorpecidas por la acción burocrática orientada al interés de unos cuantos, y que por otro lado que se proponga de manera imperativa a las instituciones, ya sean públicas o privadas, que tomen medidas correctivas y preventivas para el deterioro del medioambiente en general.

12. Anexos

Anexo I. Diagramas de circuitos en serie y paralelo

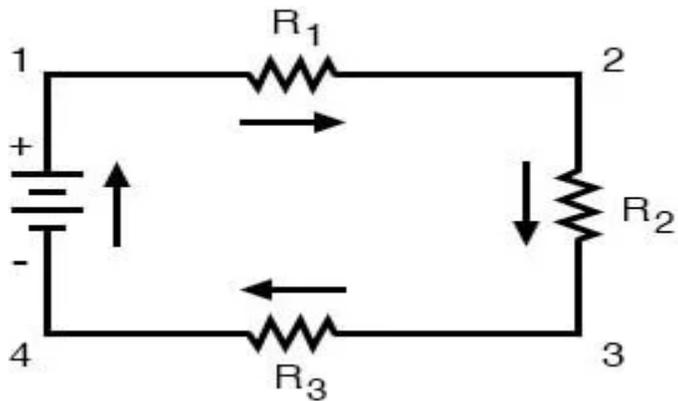


Diagrama de circuito en serie (elaboración propia)

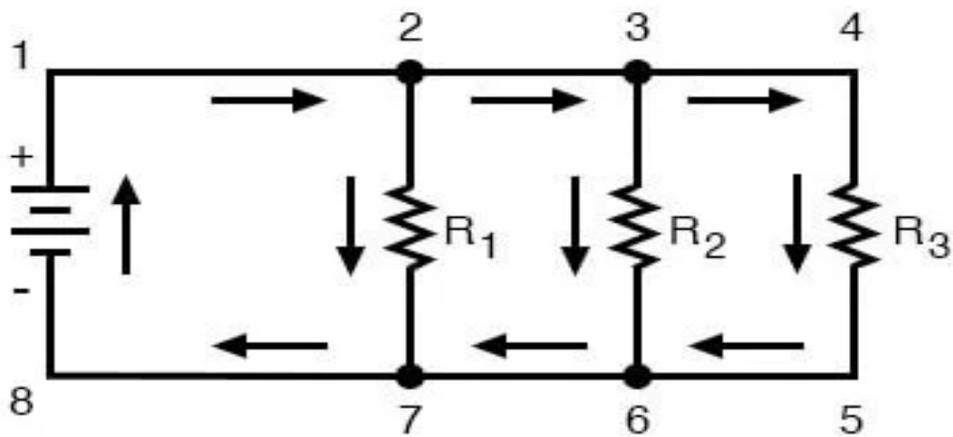


Diagrama de circuito en paralelo (Elaboración propia)

Anexo II. Normas Oficiales Mexicanas para caracterización de efluentes de agua residuales

-Norma Mexicana NMX-AA-093-SCFI- ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA - MÉTODO DE PRUEBA

Esta norma oficial mexicana establece el método de prueba para la determinación de la conductividad eléctrica en el agua y es aplicable para agua potable, natural, tratada, residual, salina y residual tratada.

Este método se basa en la propiedad que adquiere el agua de conducir la corriente eléctrica cuando tiene iones disueltos. Este fenómeno puede explicarse por medio de la disociación electrolítica. Cuando se disuelve en el agua una base, un ácido o una sal, en la cual una porción de esta se disocia en iones positivos y negativos.

Estos iones se mueven de manera independiente a los electrodos de carga positiva o negativa. La cantidad de moléculas que se ha disociado depende de la concentración de la solución. Las soluciones, al igual que los electrodos, están ligados a la ley de Ohm.

La determinación de la conductividad es de gran importancia pues esta nos da una idea del grado de mineralización de una muestra de agua presente en un cuerpo de agua o bien para ser usada en laboratorio.

Este parámetro es un parámetro regulado por límites máximos permisibles en descargas de aguas residuales al alcantarillado o cuerpos receptores, también es un parámetro de calidad del agua para usos y actividades agrícolas, para contacto primario y para el consumo humano.

Donde el equipo utilizado es un medidor de conductividad (Conductímetro): Que consiste en una fuente de corriente alterna en un puente de *Wheatstone* equivalente que mida el índice de corriente alterna y su voltaje a través de la celda, proporcionando una lectura lineal de la conductividad.

Para mediciones de campo, se requiere de un equipo portátil que posea las mismas características que un equipo de laboratorio y no mida la conductividad con un error que no exceda el 1 % o el 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Cuando sea posible debe realizarse la prueba debido a que el intercambio de gases tales como el Dióxido de carbono y Amonio o la actividad biológica pueda alterar la concentración y por ende la conductividad eléctrica de la muestra.

Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2013 ANÁLISIS DE AGUA – MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA

Esta norma mexicana establece el método de prueba para la medición de la temperatura, cuando se usan los instrumentos de medición directa o instrumentos

que indican expansiones o fuerzas proporcionales en los cambios de temperatura en cuerpos de agua, aguas salinas, aguas residuales tratadas municipales e industriales en el intervalo de 0°C a 45 °C.

Para su uso doméstico como fuente de abastecimiento de agua potable, público urbano, recreativo con y sin contacto directo, riego agrícola, pecuario, acuacultura, industrial, protección de la vida acuática marina, alcantarillado municipal o reúso. Esta norma es de aplicación nacional.

Sustentándose como el grado Celsius y el grado Kelvin como unidades de magnitud. El método de prueba normado establece el procedimiento para realizar la medición en el sitio donde se encuentra el agua y el resultado se expresa en grados Celsius (°C).

Las temperaturas elevadas en el agua pueden ser indicadores de actividad biológica, química y física, lo que tiene influencia en los tratamientos de agua, así como la evaluación de un cuerpo de agua, por lo que es de suma importancia medir la temperatura como un indicador de la presencia de compuestos y contaminantes a través del método de prueba que se establece en la presente norma.

El valor de la temperatura es un criterio de calidad del agua para la protección de la vida acuática y para las fuentes de abastecimiento de agua potable, lo que está también un parámetro establecido como límite máximo permitido en las descargas de aguas residuales y una especificación de importancia en los cálculos de balance de energía y de calor de los procesos industriales.

Procedimiento: Siempre y cuando se posible realizar la medición directamente en el cuerpo de agua, en el caso de que o sea posible, extraer una porción de la muestra y esperar el tiempo suficiente para obtener mediciones constantes. Las lecturas se obtienen directamente de la escala del aparato medidor de temperatura (Termómetro de inmersión total o parcial, Termómetro con sensor termistor, Termopar o termómetro con resistencia.).

En el caso de aguas residuales, de ser posible todas las lecturas deben hacerse en las descargas o bien recolectar la muestra y realizar la medición. En el caso de que no sea posible, esta puede medirse en un punto accesible del conducto más próximo a la descarga y una vez tomada la muestra, mover en forma circular durante unos segundos para que se realice un equilibrio entre los perfiles de temperatura presentes en la muestra. Sumergir inmediatamente el termómetro en posición centrada en el recipiente, hasta la marca de inmersión del instrumento durante 1 minuto hasta que la lectura del termómetro se estabilice, para su posterior lectura y registro de los valores.

Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2016 ANÁLISIS DE AGUA. - MEDICIÓN DEL pH EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS. MÉTODO DE PRUEBA

Esta norma es de aplicación nacional y establece el método de prueba para la medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, en el intervalo de pH a 0 a pH 14 y en un intervalo de temperatura de 0° C a 50°C.

La medición del pH del agua es muy importante para muchos tipos de muestra. Los valores altos y bajos de pH son tóxicos para los organismos acuáticos, equipos y para el contacto o consumo humano. Es importante para el funcionamiento efectivo de los procesos de tratamiento de aguas y su control, por ejemplo, en floculación y desinfección con cloro, el control de disolución de metales en canales y conductos y tratamiento biológico de aguas residuales.

Los métodos electrométricos están basados en la medición de la diferencia de potencial de una celda electroquímica, la cual consta de dos medidas celdas. Donde la primera celda consiste en un electrodo de medición y la segunda un electrodo de referencia. El potencial del electrodo de medición es una función de la actividad de los iones de hidrógeno en disolución de medición. La medición de ele valor de pH está basado en la diferencia de potencial de una celda electroquímica empleando un potenciómetro adecuado.

Norma Mexicana NMX-AA-017-1980, Aguas-Determinación de color

La presente norma establece el método de prueba mediante espectrofotómetro hará la determinación de color en aguas.

El termino color tal cual se aplica en aguas, se refiere a el valor numérico de luminancia, longitud de onda obteniendo la medición de la luz transmitida después de eliminar sólidos suspendidos y las partículas coloidales.

El método se basa en medir la transmisión de la luz a través de una muestra de agua, la cual se compara con un testigo (patrón), generalmente agua destilada cuya transmitancia es de 100% utilizando un espectrofotómetro que sea capaz de medir las unidades numéricas de color de las muestras.

Norma Mexicana NMX-AA-030/2-SCFI-2011 ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA - PARTE 2 - DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO – MÉTODO DE TUBO SELLADO A PEQUEÑA ESCALA

Esta norma mexicana especifica un método para la determinación de la demanda química de oxígeno usando el método de tubo sellado. La prueba es empírica y aplicable a cualquier muestra acuosa, que incluye todo tipo de agua residual y de desecho industrial.

El valor de la demanda química de oxígeno del agua, determinado a través de este método puede ser considerada como medida aproximada de la demanda teórica de oxígeno, por ejemplo: la cantidad de oxígeno consumida en la oxidación química

total de constituyentes orgánicos presentes en el agua. La prueba de DQO es una prueba empírica y los efectos de cualquier agente oxidante o reductor son incluidos en el resultado. Para aguas del tipo residuales, de desecho industrial u otras aguas contaminadas, el valor de DQO es una medida realista de la demanda química de oxígeno.

Las muestras se oxidan mediante digestión con ácido sulfúrico y dicromato de potasio en presencia de sulfato de plata y sulfato de mercurio (II). La plata actúa como catalizador para oxidar la materia orgánica más resistente. El mercurio reduce la interferencia causada por la presencia de iones cloruro. La cantidad de dicromato utilizadas en la oxidación de la muestra se determina midiendo la absorbancia de cromo (III) formando una longitud de onda de 600 a 20 nanómetros en intervalos de 1000 mg/L. Las medidas de absorbancia se efectúan en el tubo de digestión y son convertidas a un valor de DQO.

Anexo III. Tabla de Parámetros de caracterización de aguas residuales NOM-001-SEMARNAT-1996

Parámetros (.) (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Rios, arroyos, canales y lagunas			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas y estuarios			Suelo					
	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos		
	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.
Temperatura	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Grasas y Aceites	15	25	15	25	15	25	15	25	15	15	25	15	15	25	15
Sólidos Suspendedos Totales (TDS)	115	200	75	125	40	60	20	24	28	75	125	40	60	150	200
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	150	200	75	125	40	60	150	200	75	125	75	150	NA	75	150
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	15	25	NA	NA	NA	NA
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	NA	NA	NA	NA	5
Huevos de Helminthos (Huevo/Litro)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Escherichia Coli. (NMP/100)	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400
Enterococos Fecales (NMP/100)	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400	1000	1200	1400

Anexo IV. Límites permisibles para Metales y Cianuros. NOM-001-SEMARNAT-2021

Parámetros (miligramos por litro)	Ríos, arroyos, canales y lagunas			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas y estuarios			Suelo								
	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico		
-																		
Arsénico	0.2	0.3	0.4	0.1	0.15	0.2	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.2	0.15	0.2
Cadmio	0.2	0.3	0.4	0.1	0.15	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.75	1	0.1	0.15	0.2	0.5	0.75	1
Cobre	4	5	6	1	1.5	2	2	2.5	3	4	5	6	4	5	6	4	5	6
Cromo	1	1.25	1.5	4	5	6	1	1.25	1.5	0.5	0.75	1	0.5	0.75	1	0.5	0.75	1
Mercurio	.01	.015	.02	.005	.008	.01	.01	.015	.02	.005	.008	.01	.005	.008	.01	.005	.008	.01
Níquel	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4
Plomo	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.5	0.75	1	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	2	3	4
Zinc	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20
Parámetros medidos de manera total	PM: Promedio Mensual, PD: Promedio Diario, VI: Valor Instantáneo.																	

Anexo V. Pruebas de ionización electroquímica en aguas residuales comerciales

Con objetivo de probar la eficiencia y robustez de la tecnología de ionización electroquímica, se realizó una prueba con el prototipo a aguas residuales comerciales, con el fin de observar la eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos y demostrar que esta tecnología no solo tiene la capacidad de degradar la materia orgánica presente en las aguas grises, sino que esta se pueda ajustar a diferentes tipos de aguas residuales.

El influente a tratar proviene de las aguas residuales de un centro comercial ubicado al norte de la ciudad de México, en la Tabla 17 se muestra la calidad del influente previo al tratamiento.

Tabla 17. Caracterización de efluente de agua residual (aguas residuales comerciales).2023

Agua residual comercial.	
pH	7.86
T(C°)	25.3
Conductividad eléctrica (µs/cm)	1034
SDT(mg/L)	518
Color PCU	2853
DQO(mg/L)	1562

Para estas aguas residuales, se realizaron 3 corridas en el que el principal objetivo fue el observar el comportamiento del prototipo y la tecnología de ionización electroquímica en una situación real y determinar posibles áreas de mejora, ver Figura 39 y Figura 40.



Figura 39. Vista del prototipo en prueba en campo.2023



Figura 40. Efluente de agua residual comercial.2023

Como se puede observar en la Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20 los resultados obtenidos en cada una de las corridas, presenta resultados que comprueban la remoción de contaminantes en las aguas residuales, lo que la posiciona como una posible opción a considerar en la implementación de nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales.

Tabla 18. Caracterización de efluente de agua residual comercial No 1.2023.

Agua residual comercial.	
pH	8.7
T(C°)	26.5
Conductividad eléctrica (µs/cm)	872
SDT(mg/L)	436
Color PCU	144
DQO(mg/L)	311

Tabla 19. Caracterización de efluente de agua residual comercial No 2.2023

Agua residual comercial.	
pH	8.87
T(C°)	26.6
Conductividad eléctrica (µs/cm)	872
SDT(mg/L)	435
Color PCU	105
DQO(mg/L)	312

Tabla 20. Caracterización de efluente de agua residual comercial No 3. 2023.

Agua residual comercial.	
pH	9.22
T(C°)	26.7
Conductividad eléctrica (µs/cm)	857
SDT(mg/L)	428
Color PCU	98
DQO(mg/L)	533

Lo que denotan los resultados de las corridas es una reducción considerable en el parámetro guía de DQO, los cuales presentaron valores 5 veces más altos que los valores de aguas grises. Sin embargo, el efluente no cumple con los criterios de la NOM-001-SEMARNAT-2021. Esto no significa un fracaso en la implementación de la tecnología, sino que gracias a estas pruebas fue posible encontrar áreas de mejora y optimización en el prototipo para obtener resultados apegados a la norma en las próximas experimentaciones.

En estas pruebas se incidieron los voltajes reportados en la Tabla 21 ya que estos fueron los que mejores resultados obtuvieron en la experimentación realizada a aguas grises. Esta información revela la eficiencia de un 80% del tratamiento a aguas residuales comerciales (1562 mg C/L), ofreciendo perspectivas de mejora al proceso y promete resultados confiables para próximos trabajos de investigación en diferentes tipos de aguas residuales donde se denota la adaptabilidad de esta planta de aguas grises a un posible escalamiento para tratar aguas residuales industriales.

Tabla 21. Corrida de planta prototipo en aguas residuales comerciales.2023.

Voltaje	Densidad de corriente A/m ²	Corriente consumida en Amp C.A
5.5	10.45	3.5
5.5	10.45	2.85
6.8	19.29	2.8

Anexo VI. Análisis energético de planta prototipo de aguas residuales por la tecnología de ionización electroquímica

Por medio de la información generada en este trabajo de investigación, se procedió a hacer un análisis económico, a partir de la energía utilizada en el proceso de ionización electroquímica, en la que fue de vital importancia observar el consumo eléctrico de esta tecnología, debido a que de ella depende su operación al 100%.

Una vez concluidas las pruebas, se procedió a generar la información necesaria para calcular el consumo eléctrico y determinar cuánta energía demanda el proceso para tratar 1 m³ de agua residual y así mismo obtener un costo unitario por metro cubico de agua residual. Que sirva como cuadro comparativo de costos unitarios el gasto energético de las plantas de tratamiento de aguas ya existentes.

Una vez determinado el voltaje óptimo para los reactores, se procede a calcular los Watts consumidos durante el proceso, a partir de la siguiente ecuación que resulta de la ley de ohm:

$$AxV = W$$

Donde A= Intensidad de corriente eléctrica (amperes), V= Voltaje (mV) y W= Potencia eléctrica (watts).

$$2.38A \times 220V = 523.6Watts$$

Lo que es igual a 0.523 kW.

En esta sección procede a hacer el cálculo de la energía eléctrica necesaria para tratar 1 m³ de agua residual mediante la tecnología de ionización electroquímica.

$$kW \times hr = kw.hr$$

$$0.523 kW \times 16.67hr = 8.71 kW.hr$$

Y por último se obtiene el costo de la energía eléctrica necesaria para poder tratar 1 m³ de agua residual mediante esta tecnología. Para esto se considera la tarifa media de energía eléctrica que suministra la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para uso industrial.

$$\text{Costo de suministro eléctrico} \times \text{kW} \cdot \text{hr} = \text{Costo unitario por m}^3$$

$$1.14\$ \text{ M.N} \times 8.71\text{KW} \cdot \text{hr} = \$9.92$$

El costo unitario por metro cubico de agua residual tratada mediante esta tecnología denota un costo menor a los precios que maneja el Servicio de Aguas de la Ciudad de México (Sacmex) ya que, en las 26 plantas de tratamiento de aguas residuales distribuidas a lo largo de la urbe, tiene costos que oscilan de los \$66.1 hasta los \$77.17. Ultimominuto.2022. En cuanto se vende el agua tratada de las PTAR de Sacmex. (2022, diciembre).

En una simple comparativa con respecto al costo para tratar agua residual mediante la tecnología de ionización electroquímica, los reactores biológicos tienen costos más elevados debido a la demanda energética de su proceso, el cual eleva el precio del tratamiento de efluentes. Sin embargo el tratamiento mediante reactores electroquímicos presenta una alternativa económica para el tratamiento de las aguas residuales y si en esta se sigue generando más investigación, esta tecnología se podrá posicionar como una de las mejores alternativas para el tratamiento de aguas residuales en general, debido a que el proceso técnicamente es eficiente, ambientalmente genera un menor impacto y socialmente la tecnología presenta beneficios tangibles a la población en general, sea cual sea su actividad humana.

13. Bibliografía

Arango Ruíz, A., & Garcés Giraldo, L. F. (2007). DISEÑO DE UNA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA. Recuperado el 20 de octubre de 2022, de Universidad EAFIT: <https://www.redalyc.org/pdf/215/21514706.pdf>

Biopur habitat.2021. La tasa de flujo de agua en función del diámetro de la tubería. (s. f.). recuperado el 18 de septiembre de 2023 de, https://www.biopur-habitat.com/es/blog/10_que-caudal-de-agua-segun-el-diametro-de-la-tuberia.html

Chapman, J (2012). MÁQUINAS ELÉCTRICAS (5ed) Mc Graw Hill.

Comisión Federal de Electricidad.2023. Tarifas CRE industria. Recuperado el 9 de octubre de 2023 de, <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Tarifas/DemandaIndustrialSub.aspx>

Daniel C. Harris, Análisis Químico Cuantitativo 2ª edición, Ed. Reverte. Capitulo 13

Deshpande, A. M., Satyanarayan, S. y Ramakant, S. (2010). Treatment of high-strength pharmaceutical wastewater by electrocoagulation combined with anaerobic process. Water Science and Technology–WST–61.2. IWA Publishing.

Diario Oficial De La Nación.(2013). ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA - PARTE 2 - DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO – MÉTODO DE TUBO SELLADO A PEQUEÑA ESCALA.(Norma Mexicana NMX-AA-030/2-SCFI-2011).

Diario Oficial De La Nación.(2014). ANÁLISIS DE AGUA – MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA.(Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2013).

Diario Oficial De La Nación.(2016). ANÁLISIS DE AGUA. - MEDICIÓN DEL pH EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS. MÉTODO DE PRUEBA.(Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2016).

Diario Oficial De La Nación.(2018). ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTROLÍTICA - MÉTODO DE PRUEBA.(Norma Mexicana NMX-AA-093-SCFI).

Diario Oficial De La Nación.(2022). ANÁLISIS DE AGUA-MEDICIÓN DE COLOR VERDADERO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES, RESIDUALES TRATADAS Y MARINAS-MEDIANTE COEFICIENTES DE ABSORCIÓN ESPECTRAL-MÉTODO DE PRUEBA.(Norma Mexicana NMX-AA-017-SCFI-2021).

Electroquímica. (s. f.). recuperado el día 18 de enero de 2023. De, <https://www.quimica.es/enciclopedia/Electroqu%C3%ADmica.html>

ERIKSSON, E., Auffarth, K., HENZE, M., LEDIN, A. (2001). Characteristics of grey wastewater. Denmark: Environment and Resources, Technical University of Denmark.

F. R. Quintanella y R. C. Redondo Melchor. Diccionario de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Salamanca. 2006 recuperado el día 1 de marzo de 2023. De, <https://electricidad.usal.es/Diccionario>

GE Jiantuan. New bipolar electrocoagulation – electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. Separation and Purification Technology. Vol 36 no. 1 (Abril 2004); p. 33-39.

Ghosh D., Medhi C.R., Purkait M.K. (2008). Treatment of fluoride containing drinking water by electrocoagulation using monopolar and bipolar electrode connections. Chemosphere 73, 1393–1400.

Global Seafood Alliance. (2022). Conductividad eléctrica del agua, parte 1 - Responsible Seafood Advocate.

<https://www.globalseafood.org/advocate/conductividad-electrica-del-agua-parte-1/>

Gray, S., and Becker, N. (2002). Contaminant flows in urban residential water systems. Australia: SCIRO Molecular Science.

Hanna Instruments (2023) ¿Qué es el pH? Recuperado el 9 de enero de 2023, de <https://www.hannacolombia.com/blog/post/447/que-es-el-ph>

Hanna Instruments (2023) Colorimetría del agua, recuperado el 8 de enero de 2023 de <https://www.hannacolombia.com/productos/producto/hi-727-colorimetro-de-color-de-agua>

Holt, Peter K; Barton Geoffrey W. and Mitchell, Cynthia A. Electrocoagulation as a wastewater Treatment. In Annual Australian Environmental Engineering Research. (3: 199: Castlemaine, Victoria). Proceeding The Third Annual Australian Environmental Engineering Research Event Castlemaine, Victoria: 1999.

Holt, Peter K; Barton Geoffrey W. and MITCHEL, Cynthia A. (2005). The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology. In: Chemosphere vol. 59 no 3 p. 355-367.

Inmesol. (2017). Alessandro Volta, inventor de la pila eléctrica (1745-1827). Inmesol. Recuperado el día 25 de enero de 2023, de, <https://www.inmesol.es/blog/alessandro-volta-inventor-de-la-pila-1745-1827#:~:text=El%20cient%C3%ADfico%20invent%C3%B3%20la%20denominada,un%20flujo%20estable%20de%20electricidad.>

Jiang, Jia-Quian. Laboratory study of electro-coagulation- flotation for water treatment. Water Research Vol 36. No 16. (Sep 2002): p: 235-242.

Mollah, Mohammad. (2004) Fundamentals, Present and future perspectives of electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials. Vol 114 p 199-210.

Mollah, M. y Yusuf A., (2001) . Electrocoagulation (EC) – Science and applications . Journal of Hazardous Materials. Vol 84. No 1 pag. 29-41.

Moreno-Casillas, H. A., Cocke, D. L., Gomes, J. A. G., Morkovsky, P., Praga, J. R., & Peterson, E. (2007). Electrocoagulation mechanism for COD removal. ScienceDirect, 56, recuperado el día 11 de diciembre de 2022. De, www.sciencedirect.com.

Núñez, L. (s. f.). Análisis de riesgo sanitario en aguas grises de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Recuperado el día 5 de marzo de 2023. De, https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000400003

Osorio, C. P. (2022,). Definiciones de ánodo y cátodo. diferencias. Recuperado el día 19 de enero de 2023. De, YuBrain. <https://www.yubrain.com/ciencia/quimica/definicion-de-anodo-y-catodo/>

Soberanis-Piña, M., Martín Domínguez, A., González-Ramírez, CA., Prieto García, f., Guevara-Lara, A y García-Espinoza, JE. (2011) Review of Design Variables and Operation Conditions in Electrocoagulation. Rev. Mex. Ing. Quím vol.10 no 2.

Tchobanglous, G., Burton, L., & Stensel, H. (2003). Wastewater Engineering Treatment and Reuse (4.a ed.). Mc Graw Hill.

Ultimominuto.2022. En cuanto se vende el agua tratada de las PTAR de Sacmex. (2022, diciembre). Recuperado el día 17 septiembre de 2023, de <https://www.ultimominuto.news/noticias/CDMX-en-cuanto-se-vende-el-agua-tratada-de-las-PTAR-de-Sacmex-20221007-0027.html>

Un-Water, & Un-Water. (2019). UN World Water Development Report 2019 | UN-Water. UN-Water. <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2019>.

WILLIAMS Kent(2023). What is the Fus Over Total Dissolved Solids?. The PPOA PUMPROOM PRESS-TECH TALK.