



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“DISEÑO DE UN ELECTROCOAGULADOR PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA
LÁCTEA FAMILAC DEL CANTÓN CHAMBO”**

TRABAJO DE TITULACIÓN
TIPO: PROYECTO TÉCNICO

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: SEGUNDO ERNESTO TENELEMA GUAMÁN

TUTORA: ING. MABEL MARIELA PARADA RIVERA

Riobamba - Ecuador

2019

©2019, Segundo Ernesto Tenelema Guamán

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal de Trabajo de titulación certifica que: El trabajo de investigación: Tipo técnico: **DISEÑO DE UN ELECTROCOAGULADOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA FAMILAC DEL CANTÓN CHAMBO**, de responsabilidad del señor **SEGUNDO ERNESTO TENELEMA GUAMÁN**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal de Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Mabel Mariela Parada Rivera DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	-----	-----
Ing. Marco Raúl Chuiza Rojas MIEMBRO DEL TRIBUNAL	-----	-----

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Segundo Ernesto Tenelema Guamán declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Riobamba, 22 de enero de 2019

Segundo Ernesto Tenelema Guamán

Cédula de identidad: 060432744-5

Yo, SEGUNDO ERNESTO TENELEMA GUAMÁN soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este Trabajo de Titulación y el patrimonio intelectual del Trabajo de Titulación pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Segundo Ernesto Tenelema Guamán

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación dedico de todo corazón a las personas que me ayudaron culminar mis estudios de tercer nivel, a mis padres Segundo Tenelema e Isabel Guamán por el inmenso apoyo tanto económico como moral, también dedico a mis dos hermanos Marcelo y Martha Tenelema Guamán quienes con sus palabras me alentaban constantemente en cada ciclo de estudio, a pesar de ello son las mejores personas que he tenido en mi vida y por tanto el triunfo también es suyo.

Este trabajo también lo dedico a la persona que alegra mi vida constantemente y ha llegado a ocupar un lugar muy importante dentro de mí, sobre todas las cosas es la mejor amiga que tengo y con quien puedo hablar absolutamente todo lo que ocurre en mi vida. Quien fue la persona que de una u otra manera ayudo en la culminación de este trabajo, me refiero a ti Mashita.

Ernesto

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios por haberme dado sabiduría y sobre todo la vida, y en segunda instancia a todos docentes de la Escuela de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, quienes compartieron sus conocimientos para mi formación académica y de esa manera ayudaron a obtención este grado académico.

Especialmente agradezco a la Ingeniera Mabel Parada y al Ingeniero Marco Chuiza, quienes con sus tutorías, sugerencias y conocimientos me guiaron infinitamente para la realización de este trabajo.

Al señor Víctor Remache, gerente de la industria láctea Familac, quien me permitió realizar este trabajo en sus instalaciones, del cual he adquirido un gran conocimiento.

A todos mis amigos quienes compartieron aulas conmigo y en especial a Nelson, Jorge, Maritza quienes me brindaron su amistad incondicional desde que inicie mi carrera estudiantil.

Por todo ello les agradezco de todo corazón y Dios me los bendiga siempre

Ernesto

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	XVI
ABSTRACT	XVII
CAPÍTULO I	
1 DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	1
1.1 Identificación del problema	1
1.2 Justificación del proyecto	1
1.3 Línea base del proyecto	2
1.3.1 <i>Antecedentes de la empresa</i>	2
1.3.2 <i>Marco conceptual</i>	2
1.3.2.1 <i>Fundamentos de la electrocoagulación</i>	2
1.3.2.2 <i>Celda de electrocoagulación</i>	4
1.3.2.3 <i>Reacciones involucradas en la electrocoagulación</i>	5
1.3.2.4 <i>Generación de lodos residuales durante la electrocoagulación</i>	6
1.3.2.5 <i>Factores que afectan al proceso de electrocoagulación</i>	7
1.3.2.6 <i>Tipos de celdas de electroquímicas</i>	9
1.3.2.7 <i>Ventajas y desventajas del proceso de electrocoagulación</i>	12
1.3.2.8 <i>Construcción del sistema de electrocoagulación</i>	13
1.3.2.9 <i>Sedimentación de flujo vertical</i>	15
1.3.2.10 <i>Aguas residuales de la industria láctea</i>	16
1.3.2.11 <i>Principales parámetros físico-químicos del agua residual</i>	16
1.4 Beneficiarios directos e indirectos	19
1.4.1 <i>Beneficiarios directos</i>	19
1.4.2 <i>Beneficiarios indirectos</i>	19
CAPÍTULO II	
2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	20
2.1 Objetivo General	20
2.2 Objetivos Específicos	20
CAPÍTULO III	
3 ESTUDIO TÉCNICO	21
3.1 Localización del proyecto	21
3.2 Ingeniería del proyecto	22
3.2.1 <i>Tipo de estudio</i>	22
3.2.2 <i>Metodología</i>	22
3.2.3 <i>Muestreo de aguas residuales</i>	23

3.2.4	<i>Caracterización fisicoquímica del agua residual.....</i>	<i>24</i>
3.2.5	<i>Métodos y técnicas</i>	<i>25</i>
3.2.6	<i>Procedimiento para pruebas de electrocoagulación a nivel de laboratorio.....</i>	<i>26</i>
3.2.7	<i>Pruebas de tratabilidad por electrocoagulación.....</i>	<i>28</i>
3.2.8	<i>Dimensionamiento del reactor de electrocoagulación para un caudal de 4000 l/día</i>	<i>28</i>
3.2.8.1	<i>Cálculos matemáticos para celda de pruebas</i>	<i>28</i>
3.2.8.2	<i>Dimensionamiento del reactor a escala industrial.....</i>	<i>31</i>
3.2.8.3	<i>Dimensionamiento del tanque de sedimentación.....</i>	<i>37</i>
3.2.8.4	<i>Dimensionamiento del tanque de almacenamiento</i>	<i>41</i>
3.2.9	<i>Resultados.....</i>	<i>41</i>
3.2.9.1	<i>Resultado de la caracterización físico química del agua residual antes del proceso ..</i>	<i>41</i>
3.2.9.2	<i>Resultados de la medición de caudales</i>	<i>41</i>
3.2.9.3	<i>Resultados de las pruebas de tratabilidad por electrocoagulación</i>	<i>42</i>
3.2.9.4	<i>Resultado de los porcentajes de remoción de los tratamientos T1, T2, T8 y T11</i>	<i>43</i>
3.2.9.5	<i>Resultados de la elección de la prueba de tratabilidad más aceptable.....</i>	<i>47</i>
3.2.9.6	<i>Resultado del dimensionamiento de la planta de tratamiento.....</i>	<i>52</i>
3.3	Proceso de producción.....	53
3.4	Requerimientos de tecnología, equipos y maquinaria.....	53
3.4.1	<i>Requerimiento de Equipos.....</i>	<i>53</i>
3.4.2	<i>Cantidad de metal disuelto, (W, g/m³).....</i>	<i>54</i>
3.4.3	<i>Cálculo del consumo de energía eléctrica del reactor de electrocoagulación (kWh /m³)</i>	<i>55</i>
3.4.4	<i>Vida útil de los electrodos.....</i>	<i>56</i>
3.4.5	<i>Presupuesto.....</i>	<i>57</i>
3.5	Cronograma de ejecución del proyecto.	58
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		59
CONCLUSIONES.....		61
RECOMENDACIONES.....		62
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Valores típicos de conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) según la calidad del agua.....	19
Tabla 1-3: Localización geográfica de la industria láctea FAMILAC.....	21
Tabla 2-3: Planificación de muestreo.....	24
Tabla 3-3: Límites máximo permisible de descarga al sistema de alcantarillado público	24
Tabla 4-3: Medición del caudal	25
Tabla 5-3: Métodos usados en el análisis del agua residual.....	26
Tabla 6-3: Procedimiento para las pruebas de electrocoagulación a nivel de laboratorio.	26
Tabla 7-3: Pruebas de electrocoagulación.....	28
Tabla 8-3: Voltaje obtenido experimentalmente.....	36
Tabla 9-3: Criterios para el dimensionamiento de un sedimentador circular	38
Tabla 10-3: Caracterización fisicoquímica del agua residual	41
Tabla 11-3: Caudal de producción durante una semana de trabajo.....	42
Tabla 12-3: Resultados de turbidez y pH de los tratamientos T1, T2, T8 y T11	43
Tabla 13-3: Porcentajes de remoción de los tratamientos T1, T2, T8 y T11	44
Tabla 14-3: Variabilidad de parámetros físicos en función del tiempo del (T2)	48
Tabla 15-3: Resumen del electrocoagulador.....	52
Tabla 16-3: Resumen del tanque de sedimentación.....	52
Tabla 17-3: Resumen del tanque de almacenamiento.....	52
Tabla 18-3: Materiales y equipos de muestreo	53
Tabla 19-3: Materiales, equipos y reactivos utilizados en pruebas de tratamiento.....	54
Tabla 20-3: Costo de la planta de tratamiento	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Electrodisolución de un metal en un proceso de electrocoagulación.....	3
Figura 2-1: Esquema de un reactor de electrocoagulación.	5
Figura 3-1: Análisis elemental del lodo producido en el proceso de electrocoagulación.	7
Figura 4-1: Tipos de reactores de electrocoagulación	9
Figura 5-1: Reactor de electrocoagulación (EC) con flujo horizontal y vertical	10
Figura 6-1: Reactor de electrocoagulación (EC) con disposición de canal múltiple y único. ..	10
Figura 7-1: Reactor de (EC) con distribución de electrodos monopolares y bipolares	11
Figura 8-1: Diagrama esquemático del modo de operación de un sistema Batch y Continuo..	12
Figura 9-1: Esquema del reactor de pruebas y sus dimensiones.....	13
Figura 10-1: Esquema del electrodo y sus dimensiones	14
Figura 11-1: Sedimentador estático de flujo vertical.....	15
Figura 1-3: Ubicación geográfica de la industria láctea FAMILAC	21
Figura 2-3: Dimensiones de los electrodos en función de las medidas del reactor	33
Figura 3-3: Diagrama de bloques para el tratamiento de aguas residuales.....	53

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3: Voltaje (V) vs Intensidad (I)	36
Gráfico 2-3: Caudales producidos durante una semana de labores.....	42
Gráfico 3-3: Eliminación de aceites y grasas para los tratamientos T1, T2, T8 y T11	44
Gráfico 4-3: Eliminación de DQO para los tratamientos T1, T2, T8 y T11	45
Gráfico 5-3: Eliminación de SST para los tratamientos T1, T2, T8 y T11	45
Gráfico 6-3: Eliminación de ST para los tratamientos T1, T2, T8 y T11	46
Gráfico 7-3: Eliminación de S para los tratamientos T1, T2, T8 y T11.....	46
Gráfico 8-3: Eliminación de DBO5 para los tratamientos T1, T2, T8 y T11	47
Gráfico 9-3: Variación de la turbidez en función del tiempo.....	48
Gráfico 10-3: Variación de la conductividad en función del tiempo	49
Gráfico 11-3: Variación de sólidos suspendidos en función del tiempo.....	49
Gráfico 12-3: Variación del pH en función del tiempo.....	50
Gráfico 13-3: Variación de la temperatura en función del tiempo.....	51

ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo A:** Determinación de caudal y muestreo
- Anexo B:** Implementos para el sistema de electrocoagulación
- Anexo C:** Tratamientos con electrodos de hierro y aluminio
- Anexo D:** Tratamientos 1,2,9,11 para caracterización
- Anexo E:** Tratamientos a 5,10,15,20,25 y 30 minutos con electrodos (Al-Al) y 3 Amperios
- Anexo F:** Tabla 8: Descarga al alcantarillado público del TULSMA
- Anexo G:** Caracterización inicial del agua residual (C1)
- Anexo H:** Caracterización del tratamiento número 1(T1)
- Anexo I:** Caracterización del tratamiento número 2 (T2)
- Anexo J:** Caracterización del tratamiento número 8 (T8)
- Anexo K:** Caracterización del tratamiento número 11 (T11)
- Anexo L:** Caracterización inicial del agua residual (C2)
- Anexo M:** Métodos y Análisis físico del tratamiento 2 en función del tiempo
- Anexo N:** Cantidad de metal disuelto del tratamiento 2 (T2) en función del tiempo
- Anexo O:** Sistema de electrocoagulación
- Anexo P:** Dimensiones de la celda electrolítica
- Anexo Q:** Dimensiones del electrodo de aluminio
- Anexo R:** Dimensiones del tanque de almacenamiento
- Anexo S:** Dimensiones del tanque de almacenamiento
- Anexo T:** Dimensiones de la era de secado
- Anexo U:** Sistema de tratamiento de aguas residuales

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

A	Amperios
Al	Aluminio
Al(OH)₃	Hidróxido de aluminio
CD	Corriente continua
CE	Conductividad eléctrica
cm	Centímetros
cm²	Centímetros cuadrados
cm³	Centímetros cúbicos
DBO₅	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
EC	Electrocoagulación
Fe	Hierro
Fe(OH)₂	Hidróxido ferroso
Fe(OH)₃	Hidróxido férrico
h	Horas
H₂O	Agua
H₂	Hidrogeno molecular
H⁺	Protones de hidrogeno
l	Litros
l/s	Litros por segundo
L.M. P	Límite máximo permisible
m	Metros
min	Minutos
mm	Milímetros
msnm	Metros sobre el nivel del mar
m³	Metros Cúbicos
N	Nitrógeno Total kjedahl
NaCl	Cloruro de sodio
O₂	Oxígeno molecular
pH	Potencial de Hidrógeno
s	Segundos
SD	Sólidos sedimentables
SST	Sólidos suspendidos totales

ST	Sólidos Totales
S	Sulfuros
SAQMIC	Servicios analíticos químicos y microbiológicos
TULSMA	Texto unificado de legislación secundaria de medio ambiente
V	Voltios
° C	Temperatura en grados centígrados

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo diseñar un electrocoagulador para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea FAMILAC del cantón Chambo, debido a que el agua residual generada por la industria es descargada directamente en el alcantarillado sin ningún tipo de tratamiento previo. Se inició con el muestreo del agua residual para la posterior caracterización fisicoquímica. A partir de esto se determinó los parámetros que están fuera de normativa como: Aceites y Grasas, DBO5, DQO, SST, ST y S. Seguidamente el efluente fue tratado por electrocoagulación; para ello se diseñó una celda para pruebas, cuyas variables fueron distribución de electrodos, intensidad de corriente y tiempo de tratamiento. Se desarrollaron cálculos matemáticos para el dimensionamiento del electrocoagulador y como complemento al sistema de tratamiento se diseñó un sedimentador. El diseño fue validado con el tratamiento más efectivo que presenta una distribución de electrodos Al-Al, intensidad de corriente de 3 amperios y un tiempo de 15 minutos, en estas condiciones se remueve el de 95.5 % Aceites y Grasas, 84.5 % DBO5, 83.0 % DQO, 98.7 % SST, 61.4 % ST y 92.2 %. En conclusión, con el diseño propuesto se logra reducir el grado de contaminación de las aguas residuales y cumplir a cabalidad con la norma citada en el TULSMA, Tabla 8: Límites de descarga al sistema de alcantarillado público. Se recomienda a la industria láctea FAMILAC implementar esta técnica para el tratamiento de aguas residuales debido a que se obtiene elevados porcentajes de remoción de los contaminantes.

Palabras clave: <INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA QUÍMICA>, <ELECTROCOAGULACIÓN>, <EFLUENTE>, <TRATAMIENTOS POR ELECTROCOAGULACIÓN>, <PORCENTAJES DE REMOCIÓN>, <DIMENSIONAMIENTO DEL ELECTROCOAGULADOR Y SEDIMENTADOR>.

ABSTRACT

The objective of the present titration work was to design an electrocoagulator for the wastewater treatment of the FAMILAC dairy industry in the canton of Chambo, because the wastewater generated by the industry is discharged directly into the sewer without any previous treatment. It was indicated with a sampling of the residual water for subsequent physical-chemical characterization. From this, the parameters that are out of regulation were determined: Oils and fats, BOD₅, COD, TSS, TS, and S. Then the effluent was treated by electrocoagulation; For this, a test cell was designed, whose variables were electrode distribution, current intensity and treatment time. Mathematical calculations were developed for the sizing of the electro coagulator and as a complement to the treatment system, a sedimentation system was designed. The design was validated with the most effective treatment that presents a distribution of electrodes A1-A1, the current intensity of 3 amps and a time of 15 minutes, under these conditions the 95.5% oil and grease is removed, 84.5% BOD₅, 83.0 % COD, 98.7% TSS, 61.4% TS and 92.2%. In conclusion, with the proposed design, it is possible to reduce the degree of contamination of wastewater and comply fully with the norm quoted in TULSMA, Table 8: Discharge limits to the public sewer system. It is recommended that the dairy industry FAMILAC implement this technique for the treatment of wastewater due to the high percentage of removal of contaminants.

Key words: <CHEMICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY> <ELECTRO CUAGULACION> <EFFLUENT> <TREATMENT BY ELECTRO CUAGULATION> <PERCENTAGES OF REMOVAL> <DIMENSIONING THE ELECTRO COAGULATOR AND SEDIMENTATOR>

CAPÍTULO I

1 DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Identificación del problema

En el país existe una gran cantidad de micro empresas dedicadas a la elaboración de productos lácteos como: yogur, quesos, mantequilla, manjar, etc. La mayoría de estas microempresas no poseen un sistema de tratamientos de aguas residuales comparado con empresas de gran magnitud, por tal motivo el efluente residual se vierte directamente hacia las fuentes hídricas provocando daños ambientales a la flora y fauna.

FAMILAC no cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales por tal motivo los desechos líquidos provenientes de la limpieza de equipos y áreas de trabajo son vertidos directamente al alcantarillado sin ningún tratamiento previo.

El agua residual contiene una elevada cantidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos que afectan directamente al recurso hídrico y a las tuberías del alcantarillado. Al ser una micro empresa no cuenta con capital económico para un sistema de tratamiento convencional ya que son de elevado costo y al no poseer un sistema de tratamiento de aguas residuales la fábrica incumple con Registro oficial 097-A del 4 de noviembre del 2015 Libro VI, Anexo 1, Tabla 8-Límites de Descarga al Sistema de Alcantarillado Público, del TULSMA.

1.2 Justificación del proyecto

El agua es el recurso vital para el ser humano. El efluente procedente de actividades industriales es la principal fuente de contaminación del recurso hídrico, causando enfermedades y muertes tanto en animales como en el hombre, debido al contenido de sustancias tóxicas y nocivas.

Por tal motivo se ha planteado implementar un método tecnológico como es la electrocoagulación, ya que en investigaciones realizadas se ha determinado que son eficientes y económicos en la remoción de contaminantes, logrando así estar a la par de los avances tecnológicos y cumplir con las legislaciones que cada día son más exigentes.

El proceso de electrocoagulación es una tecnología moderna que sustituye al método convencional debido a que utiliza como medio de reacción a los electrones (e^-) provenientes de la corriente eléctrica y no necesita coagulantes químicos como es el caso de los métodos convencionales, abaratando de esta manera los costos de tratamiento. Por ello se justifica la necesidad de implementar un “DISEÑO DE UN ELECTROCOAGULADOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA FAMILAC DEL CANTÓN CHAMBO” que sea capaz remover los contaminantes de sus aguas residuales.

1.3 Línea base del proyecto

1.3.1 Antecedentes de la empresa

En el país existen gran cantidad de microempresas dedicadas a la elaboración de productos lácteos, siendo un ejemplo claro el cantón Chambo que se encuentra en el centro del país, en la provincia de Chimborazo y está situada a 20 minutos de la ciudad de Riobamba, este lugar es muy reconocido por sus actividades económicas tanto en la agricultura como en la ganadería.

FAMILAC es una microempresa que está ubicada en la comunidad Tunshi san pedro perteneciente al Cantón Chambo, la misma que se encuentran en funcionamiento hace 6 años y se dedica a la elaboración de quesos, yogures y leche en funda, siendo sus consumidores mayoristas la ciudad de Riobamba y Guayaquil. Al ser una empresa alimenticia necesita condiciones higiénicas impecables en sus áreas de procesos y equipos, por tal motivo utiliza gran cantidad de agua limpia para mantener condiciones higiénicas y sanitarias el ambiente de trabajo, generando de la misma manera agua residual. Según Apaza (2018), menciona que por cada litro de leche procesada se obtiene de 2 a 6 litros de efluente.

Tomando en consideración el dato anterior, el volumen del agua residual producida por la industria FAMILAC será muy significativa debido a que la empresa procesa alrededor de 1000 litros de leche por día, con un horario de trabajo de lunes a sábado de 08:00 am – 15:00 pm, con un total 7 horas laborables cada día.

1.3.2 Marco conceptual

1.3.2.1 Fundamentos de la electrocoagulación

Según Aquino (2018), la electrocoagulación es utilizada en la remoción de diversos contaminantes de aguas residuales, entre ellos tenemos:

- Industria de papel
- Industria textil
- Industria alimentaria
- Industria de galvanoplastia
- Electro-plateado metálico
- Peleterías
- Fábricas de envasados
- Efluentes con contenido de cromo
- Efluentes de las refinerías
- Aguas residuales domésticas
- Remoción de los contaminantes de las aguas para consumo humano
- etc.

Según Martínez (2007), el proceso de electrocoagulación es muy similar a un tratamiento químico (ruptura de emulsión). Ambos tratamientos tienen como objetivo la desestabilización de los coloides, o microgotas de aceite contenidas en un agua, y se diferencia uno del otro, en el modo de adición del reactivo: en electrocoagulación se genera a partir de la electrodisolución de un metal tal como se observa en la figura 1-1, y en coagulación convencional el reactivo se añade como sal (FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y Policloruro de aluminio).

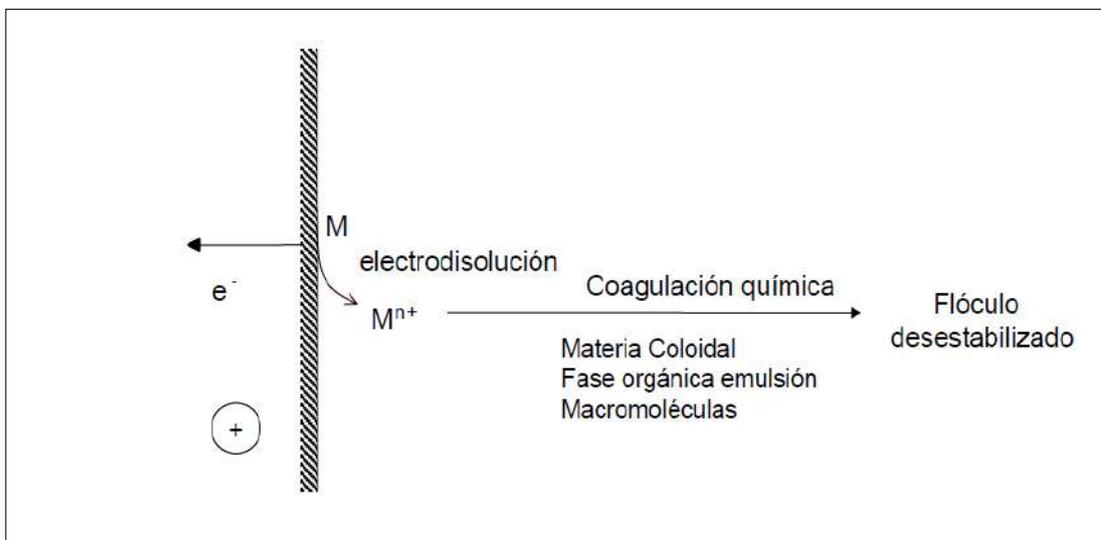


Figura 1-1: Electrodisolución de un metal en un proceso de electrocoagulación

Fuente: MARTÍNEZ, 2007. Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional .p.28

1.3.2.2 Celda de electrocoagulación

La celda de electrocoagulación está constituida principalmente de un depósito, en el que se sumergen los dos electrodos (el ánodo o electrodo de trabajo, y el cátodo o electrodo inerte), y de una fuente de poder a la que se conectan los electrodos. Al aplicar una diferencia de potencial entre los electrodos de la celda, comienzan las principales reacciones de reducción en el cátodo (conversión de protones del agua en H_2) y oxidación en el ánodo (generándose el ión Al^{3+} si el ánodo es de aluminio, o el Fe^{3+} si el ánodo es de hierro). Los iones metálicos M^+ se hidratan rápidamente (figura 2-1). A continuación, ocurren una serie de etapas interrelacionadas en las que se forman tanto hidróxidos insolubles del metal, sobre los que quedan retenidos los contaminantes, como hidroxocomplejos cargados, positiva o negativamente, que permiten la coagulación por neutralización de cargas (Martínez , 2007, p. 25).

Durante el tratamiento por electrocoagulación se presentan los siguientes procesos (Barrera, 2014).

1. Reacciones electroquímicas en la superficie del electrodo
2. Formación de coagulantes en la fase acuosa.
3. Formación de coagulantes (hidróxidos) en fase acuosa.
4. Los coagulantes atraen eléctricamente a los contaminantes solubles o coloidales y se remueven por sedimentación o por flotación.

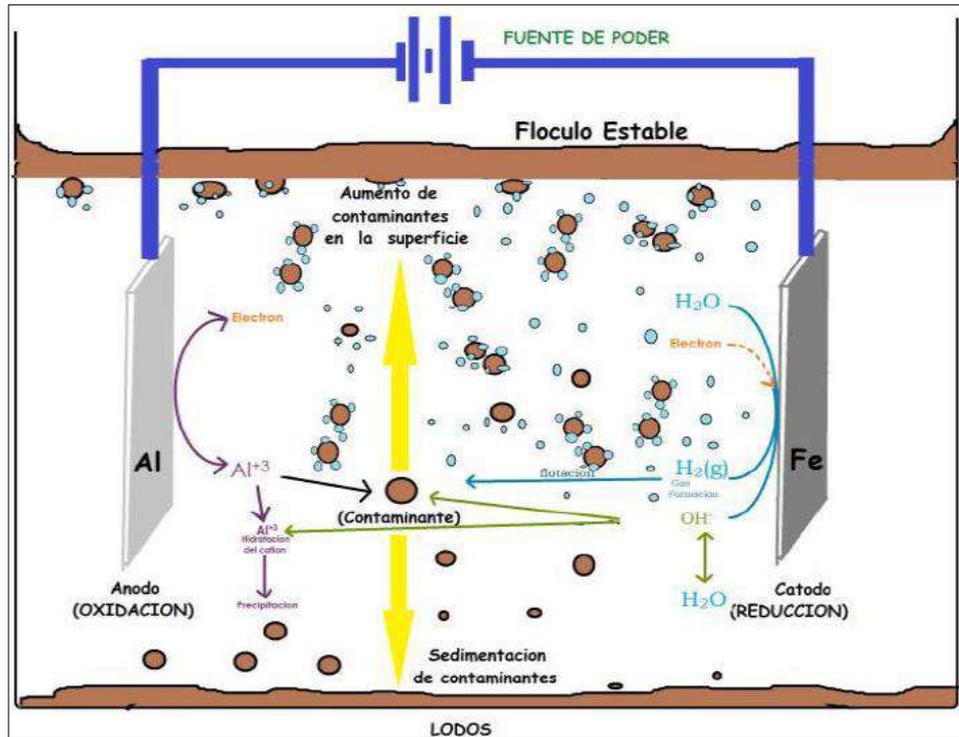


Figura 2-1: Esquema de un reactor de electrocoagulación.

Fuente: AGUILAR, 2015. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua p. 20

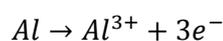
Según Apaza (2018), establece que los gases de oxígeno(O_2) e hidrógeno(H_2) generados en el proceso de electrocoagulación, hacen que la superficie del reactor genere fenómenos como:

- Generan una espuma en la superficie del reactor.
- Evitar la aglomeración de coloides en el electrodo y esta manera evita que se ensucie.
- La presencia de estos gases produce agitación espontánea y evita la utilización de agitación mecánica, debido a que las moléculas gaseosas generan corrientes ascendentes y descendentes en la solución generando una mejor superficie de contacto y por lo tanto un aumento en la eficiencia de la desestabilización.

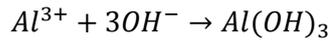
1.3.2.3 Reacciones involucradas en la electrocoagulación

A continuación, se presentan las reacciones electroquímicas que ocurren dentro de la celda (Piña et al., 2011: p. 258).

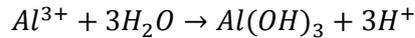
Cuando el ánodo es de aluminio:



- En condiciones alcalinas:

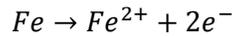


- En condiciones ácidas:

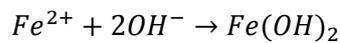


El $Al(OH)_3$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que atrae e elimina eficazmente los contaminantes.

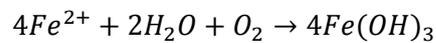
Cuando el ánodo es de Fe:



- En condiciones alcalinas:



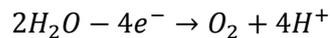
- En condiciones ácidas:



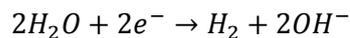
Cuando los hidróxidos de hierro se han formado los coloides se aglomeran, especialmente aquellos con carga negativa, y posteriormente otras partículas de contaminantes interactúan con estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas.

La electrolisis del agua produce gases O_2 e H_2 de la siguiente manera:

- En el ánodo:



- En el cátodo:



1.3.2.4 Generación de lodos residuales durante la electrocoagulación

En la electrocoagulación los lodos producidos son 50% menor en comparación con los tratamientos Físico-químico o biológico, y se confirma lo dicho en bibliografía que son mucho más secos y compactos, esto involucra menor problemática en su disposición final.

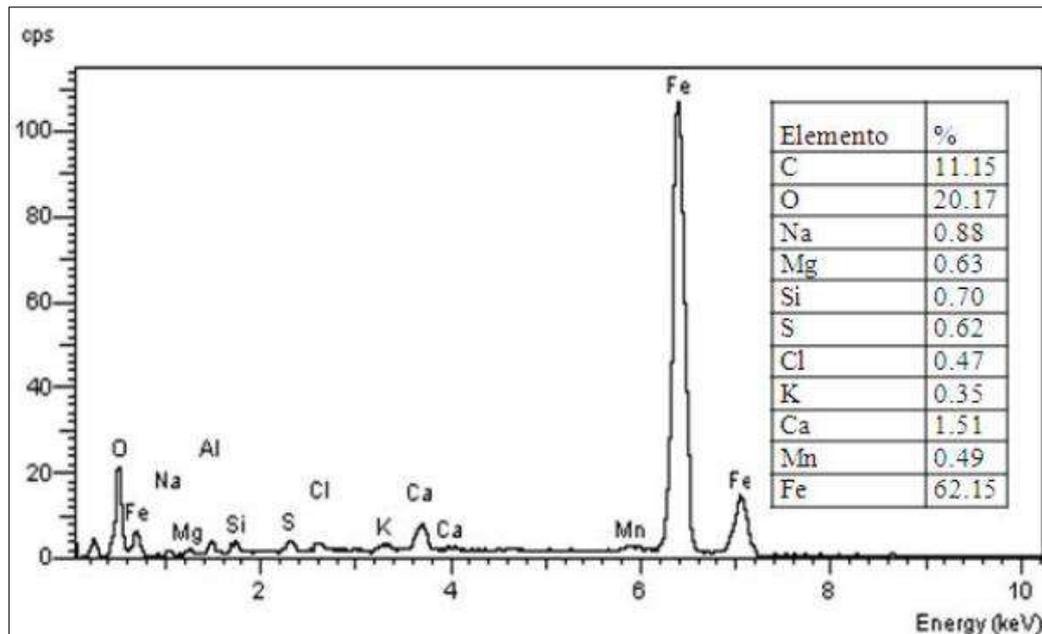


Figura 3-1: Análisis elemental del lodo producido en el proceso de electrocoagulación.

Fuente: LINARES, 2010. Oxidación de materia orgánica persistente en aguas residuales industriales mediante tratamientos electroquímicos p. 21

En la figura 3-1 se ha comprobado que el lodo generado durante el proceso de electrocoagulación está constituido principalmente por oxígeno, carbono y hierro. Con respecto al oxígeno se atribuye al suministro de aire durante el tratamiento; el carbono constituye a la materia orgánica que ha sido removida y el hierro se debe a la electrodisolución de los electrodos durante el suministro de corriente eléctrica (Linares, 2010).

1.3.2.5 Factores que afectan al proceso de electrocoagulación

Los principales factores que influyen en la eficiencia del proceso de electrocoagulación según algunos autores son:

- Efecto del pH

Influye en la eficiencia de corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. En diferentes investigaciones se ha determinado que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación, y esta variación depende del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar. En aguas residuales ácidas el pH tiende a incrementarse, efecto atribuido a la generación H_2 en el cátodo. Por el contrario, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer, dependiendo de la naturaleza del contaminante. Las mejores remociones se han conseguido a un pH cercano 7 (Aguilar, 2015, p. 22).

- Densidad de corriente

La densidad de corriente determina la cantidad de iones metálicos (Al^{+3} o Fe^{+2}) liberados por los electrodos. Cuando se aplica elevadas intensidades de corriente al reactor existe transformación de energía eléctrica en energía calorífica, aumentando la temperatura del medio acuoso y disminuyendo la eficacia del proceso. Para algunas conductividades del medio acuoso el consumo de energía se incrementa proporcionalmente con los aumentos de conductividad, lo que conlleva a un consumo mayor de energía. (Arboleda y Herrera, 2015:p. 35).

- Conductividad

El NaCl se emplea para aumentar la conductividad del agua residual que se va a tratar (Barrera , 2014, p. 172). La adición de NaCl disminuye el consumo de energía debido al aumento de la conductividad de la disolución, de igual manera la presencia de NaCl genera corrosión por picaduras del ánodo de sacrificio, lo cual hace aumentar la eficacia de corriente (Arboleda y Herrera., 2015:p. 35).

- Temperatura

Es un factor que ha sido poco estudiado, pero se ha encontrado que la eficiencia máxima de corriente se obtiene al incrementar la temperatura hasta $60^{\circ}C$ para después decrecer, esto se debe a la destrucción de la película $Al(OH)_3$ en el electrodo. Con la finalidad de evitar el incremento en el costo del tratamiento es común que los experimentos se realicen a temperatura ambiente (Hernández , 2016, p. 20).

- Tiempo de reacción

El tiempo es proporcional a la cantidad de iones metálicos disueltos en la solución, es decir a mayor tiempo de reacción mayor es la cantidad de iones metálicos (Al^{+3} o Fe^{+2}) disuelto en el sistema. También existe mayor producción de gases que al ascender llevan las partículas de óxido a la superficie en forma de espuma y a su vez promueve el crecimiento de los flóculos y su posterior precipitación (Aguilar , 2015, p. 25).

- Distribución espacial

El espacio entre los electrodos es un factor de vital importancia en la electrocoagulación, dado que a mayor distancia entre electrodos mayores es el consumo de electricidad. También está muy

relacionada con el porcentaje de remoción de los contaminantes, es decir que a menor distancia entre electrodos mayor es el porcentaje de remoción de los contaminantes (Mendieta, 2013, p. 17).

- Materiales electródicos

Los materiales más usuales empleados en la electrocoagulación son aluminio y hierro debido a que son eficientes en la remoción de contaminantes y también que son fáciles de conseguir y su precio no es elevado. Se ha encontrado que la principal aplicación de los electrodos de aluminio es para el tratamiento de aguas, debido a su alta eficiencia en la autogeneración de agentes coagulantes (Barrera , 2014, p. 174).

1.3.2.6 Tipos de celdas de electroquímicas

Existen muchos tipos de celdas electroquímicas o reactores de electrocoagulación empleadas en este proceso, y pueden clasificarse atendiendo a diferentes criterios:

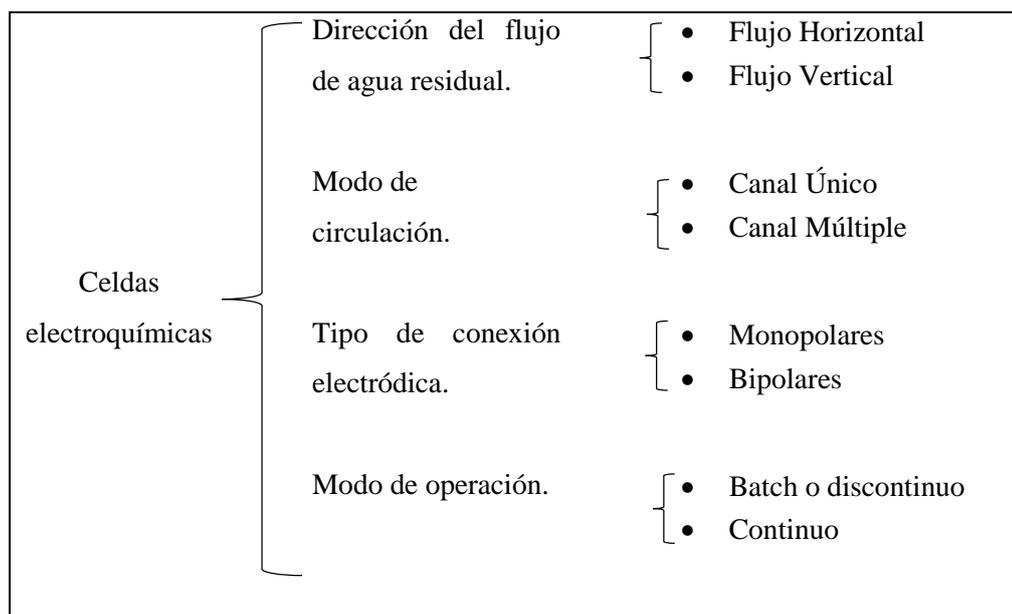


Figura 4-1: Tipos de reactores de electrocoagulación

Realizado por: Tenelema, Ernesto; 2018.

- Dirección del flujo de agua residual.

Dependiendo del flujo del agua residual los reactores pueden clasificarse en unidades de flujo horizontal y vertical como se observa en la figura 5-1. Esta disposición puede tener importancia cuando se pretende aprovechar el movimiento provocado por las moléculas de O₂ e H₂ generados en la oxidación (+) y reducción (-) del agua, respectivamente (Aguilar, 2015, p. 28).

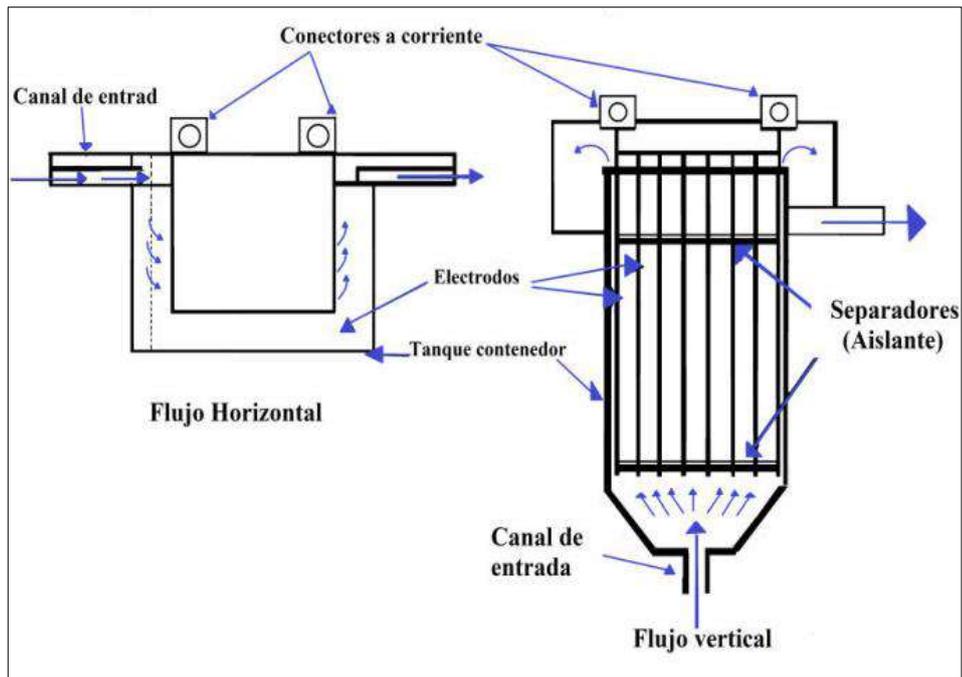


Figura 5-1: Reactor de electrocoagulación (EC) con flujo horizontal y vertical

Fuente: AGUILAR, 2015. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua p. 29

- Modo de circulación.

Dependiendo del modo de circulación del fluido entre los electrodos, se tiene canales múltiples y canal único tal como se observa en la figura 6-1. Las celdas de canales múltiples tienen la ventaja de su sencillez en su disposición. Sin embargo, debido al pequeño caudal de electrolito en cada uno de los canales favorecería al fenómeno de pasivación de los electrodos (Barrera, 2014, p. 34).

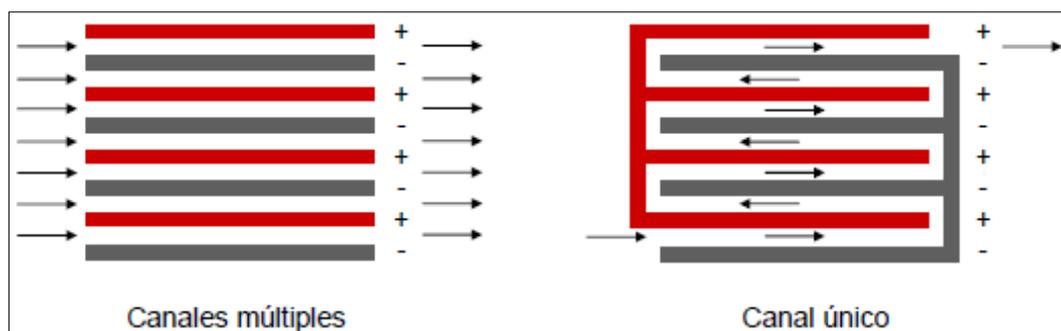


Figura 6-1: Reactor de electrocoagulación (EC) con disposición de canal múltiple y único.

Fuente: BARRERA, 2014. Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de agua residuales p. 35

- Tipo de conexión eléctrica.

Los reactores electroquímicos tienen dos tipos de conexión eléctrica la monopolar y la bipolar tal como se observa en la figura 7-1. La configuración bipolar trabaja a menor intensidad, pero a

mayor voltaje que la monopolar. Los reactores bipolares brindan la ventaja de la sencillez de su disposición, ya que sólo es necesaria la conexión de dos electrodos (electrodos alimentadores), y por tanto el espacio entre los electrodos puede ser más pequeño. Sin embargo, el elevado potencial entre los electrodos alimentadores genera que una parte de corriente fluya a través de la disolución causando bypass de corriente a los electrodos bipolares, y por tanto produce pérdidas de corriente; lo que se ha de tener en cuenta a la hora de prever el efecto sobre la producción y el tiempo de vida de electrodos (Barrera, 2014, p. 35).

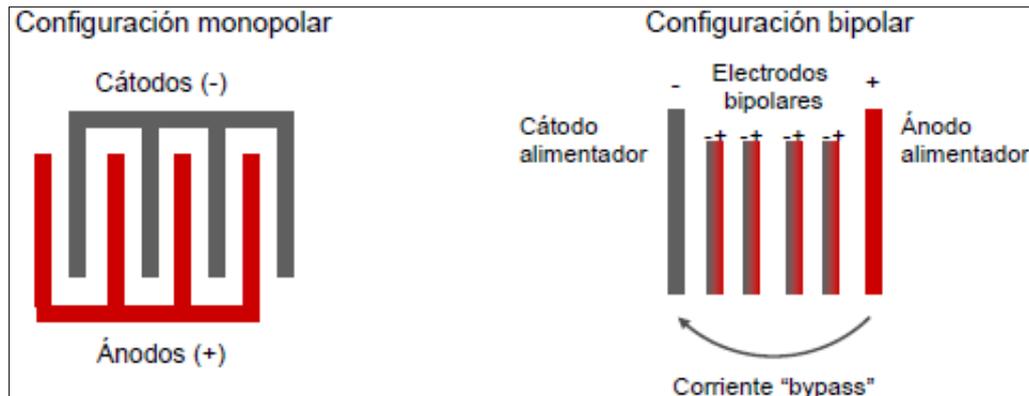


Figura 7-1: Reactor de (EC) con distribución de electrodos monopolares y bipolares

Fuente: BARRERA, 2014. Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de agua residuales p. 35

- Modo de operación (Batch y continuo)

Los reactores batch son más utilizados a escala de laboratorio para investigaciones (figura 8-1), debido a que permite estudiar la gama de condiciones de funcionamiento ya que el proceso depende del tiempo y el coagulante se genera continuamente produciendo una variación en la concentración del coagulante y pH, mientras que el reactor continuo es adecuado para procesos industriales de grandes volúmenes de efluente (Yaguana y Almeida , 2015, p. 19).

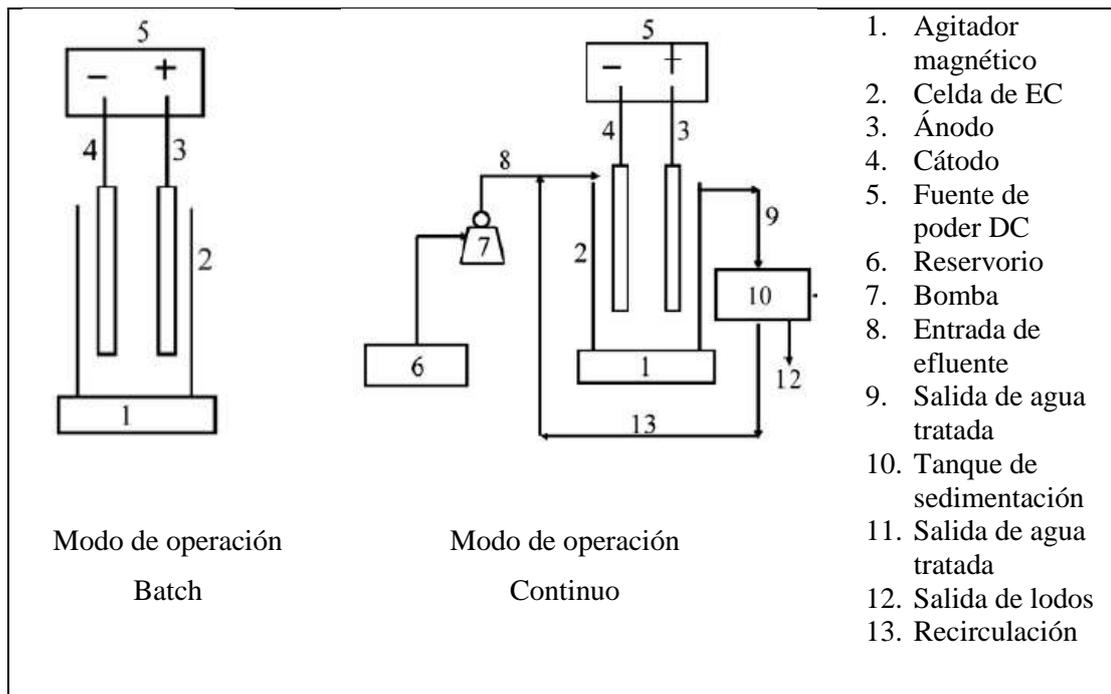


Figura 8-1: Diagrama esquemático del modo de operación de un sistema Batch y Continuo

Fuente: YAGUANA Y ALMEIDA , 2015. Diseño y construcción de un reactor prototipo a nivel de laboratorio utilizado para el tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación p. 19

1.3.2.7 Ventajas y desventajas del proceso de electrocoagulación

Según Ferniza (2017), en el estudio sobre remoción de metales pesados en efluentes mineros, las principales ventajas y desventajas de la electrocoagulación sobre el tratamiento convencional son la siguientes:

Ventajas

1. Son de bajo costo.
2. Para la construcción utiliza materiales simples y es de fácil operación.
3. La producción de lodos es 50% menor, en comparación con el tratamiento fisicoquímico.
4. Los flóculos formados son más grandes en comparación con la coagulación química.
5. Es muy eficaz en la remoción metales, cianuros y grasas.
6. Las burbujas de oxígeno e hidrógeno ayudan a la remoción de los flóculos hacia la zona de flotación (evitando el uso de agitación mecánica como en la coagulación química).
7. Produce aguas incoloras, inodora e incluso agua potable.

Desventajas

1. Reposición de los electrodos de sacrificio (ánodos).

2. Los lodos producidos contienen gran cantidad de aluminio o hierro dependiendo del electrodo.
3. El consumo de energía eléctrica puede ser elevada.
4. El óxido formado en el ánodo forma una capa que impide el paso de corriente eléctrica, disminuyendo la eficiencia del proceso.

1.3.2.8 Construcción del sistema de electrocoagulación

- Construcción de la celda de electrocoagulación

La celda de electrocoagulación a escala de laboratorio, está diseñada para tratar 1.94 L de agua residual y trabaja en régimen Batch, tiene una de forma de paralelepípedo rectangular con las siguientes dimensiones (figura 9-1):

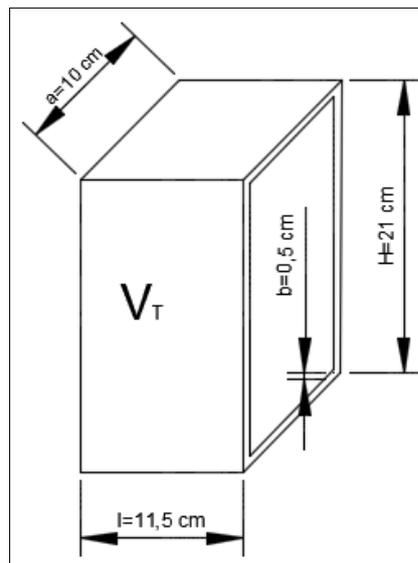


Figura 9-1: Esquema del reactor de pruebas y sus dimensiones

Realizado por: Tenelema, Ernesto; 2018.

Dimensiones:

- H : altura de la celda (cm)
- l : longitud de la celda (cm)
- a : ancho de la celda (cm)
- b : espacio bajo el borde inferior de los electrodos (cm)
- V_T : volumen total del reactor de electrocoagulación (L)

Para la construcción se usó metacrilato de metilo transparente con la finalidad de observar los procesos fisicoquímicos. En la parte superior se instaló una canaleta para recolección de lodos y en el fondo se instaló un grifo para la toma de muestras.

- Fuente de poder

La fuente de poder marca Mastech HY3010E de corriente continua tiene una capacidad de suministra una intensidad de corriente en un rango de 0 a 10 A y un rango de voltaje de 0 a 30 V, y posee dos medidores led de amperaje (A) y voltaje (V). Para la conexión con la celda de electrocoagulación se utiliza cables de cobre de color rojo y negro para diferenciar la polaridad y lagartos para la sujeción de electrodos.

- Electroodos

En las pruebas de tratabilidad se empleó un total de 16 placas metálicas como electrodos, 8 de aluminio y 8 de hierro, con las siguientes dimensiones (figura 10-1):

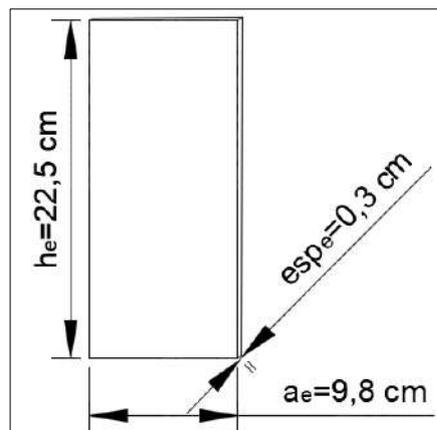


Figura 10-1: Esquema del electrodo y sus dimensiones

Realizado por: Tenelema, Ernesto; 2018.

Dimensiones:

h_e : altura del electrodo (cm)

a_e : ancho del electrodo (cm)

esp_e : espesor del electrodo (cm)

La celda tiene capacidad para 8 electrodos con un distanciamiento entre placa y placa de 1 cm, cuatro usados como electrodos de sacrificio (ánodos) y cuatro como electrodos inertes (cátodo).

- Distribución de electrodos

La distribución de electrodos se realizó de la siguiente manera Al-Al, Fe-Fe, Al-Fe y Fe-Al actuando como cátodos y ánodos según la prueba de tratabilidad.

- Tipo de Configuración electrónica

La configuración utilizada es monopolar en paralelo, para que la corriente eléctrica fluya de manera homogénea por todos los electrodos.

1.3.2.9 Sedimentación de flujo vertical

La sedimentación en las unidades de forma cilíndrica (figura 11-1) se da por efecto de la gravedad y se encarga de que los sólidos suspendidos se asienten para su posterior purga. Este tipo de sedimentadores posee en la parte interior una forma cónica con una pendiente de 45° a 60° según el tratamiento aplicado o naturaleza del agua (Maldonado, 2000, p. 30).

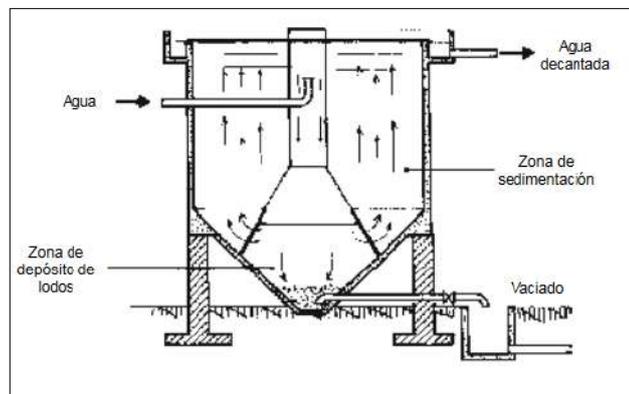


Figura 11-1: Sedimentador estático de flujo vertical

Fuente: MALDONADO, 2000. Sedimentación.p.30

Un tanque sedimentador cilíndrico por lo general consta de cuatro zonas:

- Zona de entrada: las partículas se distribuyen uniformemente.
- Zona de sedimentación: la zona en la cual las partículas dejan de estar en suspensión.
- Zona de salida: el lugar donde se recoge el agua tratada.
- Zona de lodos: es la zona reservada para la retirada de los lodos.

1.3.2.10 Aguas residuales de la industria láctea

Según Apaza (2018), menciona que las empresas lácteas consumen habitualmente grandes cantidades de agua en sus procesos, principalmente para mantener las condiciones higiénicas y sanitarias requeridas, la mayor parte del agua consumida en el proceso productivo se convierte finalmente en agua residual. El volumen de agua residual generado por una empresa láctea se pueden encontrar valores que fluctúan entre 2 y 6 L/L leche procesada. La mayor parte de estas empresas no disponen de sistemas de tratamiento de aguas residuales y eligen verterlos a cuerpos receptores de agua, representando un problema ambiental muy serio.

Afluente

Es el agua residual u otro líquido que ingresa a un cuerpo de agua receptor, reservorio, planta de tratamiento o proceso de tratamiento.

Efluente

Líquido que sale de un proceso o planta de tratamiento de aguas residuales.

1.3.2.11 Principales parámetros físico-químicos del agua residual

- Aceites y grasas

Los aceites y grasas son difíciles de metabolizar por las bacterias y flotan sobre el agua causando daños a los seres vivos al ser consumidos. Los fenoles pueden estar en el agua como resultado de contaminación industrial (alimenticios, automóviles, lubricantes, etc.) y cuando reaccionan con el cloro que se añade como desinfectante, forman clorofenoles que son un serio problema porque dan al agua muy mal olor y sabor (Riccio, 2015, pp. 43-44).

- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

DBO₅ o demanda biológica de oxígeno, determina la cantidad de materia orgánica biodegradable que posee un cuerpo de agua, y la cantidad de oxígeno necesario para su descomposición. Para la determinación de este parámetro es necesario 5 días y las unidades de medición son mg de DBO₅ por litro de agua residual (Riccio, 2015, p.60).

- Demanda Química de Oxígeno (DQO)

En la mayoría de los casos la DBO₅ y DQO están estrechamente relacionadas por lo que es de gran utilidad al no necesitar los cinco días de la DBO₅. Sin embargo, la DQO no diferencia entre materia biodegradable y el resto y no suministra información sobre la velocidad de degradación en condiciones naturales (Riccio, 2015, p.43). La DQO se determina en tres horas y mide la cantidad de oxígeno necesario para oxidar los materiales contenidos en el agua con un oxidante químico que generalmente es dicromato de potasio en medio ácido.

- Potencial de hidrógeno (pH)

El pH es un parámetro que está regulado por límites máximos permisibles de la normativa, en descargas de aguas residuales al alcantarillado o a cuerpos receptores, también es un parámetro de calidad del agua para actividades agrícolas, contacto primario y para el consumo humano (Riccio, 2015, p. 55).

- Sólidos Sedimentables

Los sólidos sedimentables son aquellos sólidos que sedimentan al dejar reposar un litro de agua residual en un cono Imhoff por una hora, y las unidades de medición son ml/l.

- Sólidos Suspendidos Totales

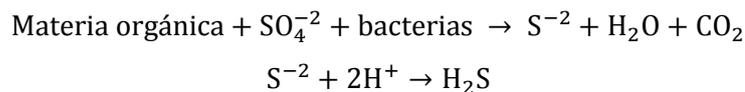
Los sólidos suspendidos totales o el residuo no filtrable de una muestra de agua natural o residual industrial o doméstica, se definen como: la porción de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio, que posteriormente se seca a 103 – 105 ° C hasta un peso constante. El incremento de peso del filtro representa el total de sólidos suspendidos (Riccio , 2015, p. 57).

- Sólidos totales

Es la sumatoria de sólidos suspendidos y sólidos sedimentables. Para determinar este parámetro se toma una muestra de agua residual y se añade en un recipiente de vidrio, se deja evaporar y secar a una temperatura entre 103 a 105 °C. La diferencia entre peso final e inicial representa la cantidad de sólidos totales y las unidades de medición son mg/l (Riccio, 2015, p. 56).

- Sulfuros

El ion sulfato se encuentra en forma natural tanto en las aguas de abastecimiento como en las aguas residuales. El azufre es un elemento indispensable para la síntesis de proteínas, y por eso se libera cuando ocurre la degradación de las mismas. Los sulfatos se reducen biológicamente a sulfuros bajo condiciones anaerobias y pueden formar sulfuros de hidrógeno (H_2S) al combinarse con el hidrógeno. A continuación, se muestra las reacciones generales que rigen estos procesos (Russell, 2012, p. 53).



- Temperatura

La temperatura del agua residual es comúnmente mayor que las aguas de suministro local, debido a la adición de agua caliente de los hogares y a las actividades industriales. La temperatura del agua es un parámetro de vital importancia, tanto en el desarrollo de la vida acuática, como en las reacciones químicas y las velocidades de reacción, así como la habilitación del agua para ciertos usos (Riccio, 2015, p. 54).

- Nitrógeno Total Kjeldahl

La mayoría de compuestos que contiene nitrógeno son nutrientes esenciales. La excesiva cantidad de nitrógeno causa eutrofización. El nitrógeno se encuentra en diferentes formas químicas en aguas residuales y contaminadas. En los análisis se determina preferiblemente el NTK (nitrógeno total Kjeldahl) esto incluye el nitrógeno amoniacal y el nitrógeno orgánico (Cevallos y Peralta, 2015).

- Conductividad

Según Ramos (2017), la conductividad determina la cantidad de sales solubles en el agua y sus unidades se representa en micro siemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Las aguas residuales tienden a aumentar la conductividad debido a la presencia de iones metálicos disueltos en el líquido residual, es importante entender que este parámetro nos brinda información sobre la calidad del agua residual como se indica en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1: Valores típicos de conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) según la calidad del agua

Agua pura	Agua poco contaminada	Agua contaminada	Agua muy contaminada	Agua excesivamente contaminada
<280	280-430	430-600	600-860	>860

Fuente: RIGOLA, 1999 Tratamiento de aguas residuales industriales p.38

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

- Turbidez

Según Monsalve y Cardona (2014), la turbidez mide el grado en el cual el agua pierde su transparencia. Esto se debe a la presencia de partículas suspendidas. Si la turbidez del agua residual es elevada significa que habrá muchas partículas suspendidas en ella. Estas partículas bloquean la luz solar y evitan que las plantas acuáticas alcancen la luz solar que necesitan para la fotosíntesis, por tal motivo es de gran importancia su remoción antes de descargarlo a un cuerpo de agua, sus unidades de medición son NTU.

1.4 Beneficiarios directos e indirectos

1.4.1 Beneficiarios directos

- El beneficiario directo de la presente investigación es la fábrica láctea FAMILAC, que a más de utilizar el sistema de tratamiento tecnológico cumplirá con la legislación pertinente del MAE.

1.4.2 Beneficiarios indirectos

- **Ámbito ambiental:** Principalmente se evita la contaminación hídrica, debido a que estos efluentes son utilizados mayoritariamente con fines domésticos y agrícolas.
- **Ámbito social:** Todas las personas que viven a su alrededor, en vista que se evitara la emanación de malos olores y con ello se garantiza un ambiente sano y limpio

CAPÍTULO II

2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

2.1 Objetivo General

- Diseñar un electrocoagulador para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea FAMILAC del cantón Chambo.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar las características fisicoquímicas del agua residual en base al reglamento de la normativa ambiental vigente.
- Identificar los parámetros que se encuentra fuera de la normativa, de las aguas provenientes de los tanques de lavado de los diferentes procesos.
- Realizar pruebas de tratabilidad empleando una celda de electrocoagulación a escala de laboratorio modificando variables como: intensidad de corriente, distribución de electrodos, y tiempo de reacción.
- Realizar los cálculos de ingeniería para el diseño teórico del equipo de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales industriales.
- Validar el diseño propuesto mediante la caracterización fisicoquímica del agua tratada en base al reglamento vigente.

CAPÍTULO III

3 ESTUDIO TÉCNICO

3.1 Localización del proyecto

El sistema de tratamiento estará localizado en los contornos de la fábrica ubicada en la comunidad Tunshi San Pedro vía a Licto perteneciente al Cantón Chambo, Provincia de Chimborazo. En la Tabla 1-3 se detallan las coordenadas geográficas del cantón. Esta zona es considerada agrícola y ganadera por tal motivo existen una gran cantidad de microempresas dedicadas a la fabricación de productos lácteos.

Tabla 1-3: Localización geográfica de la industria láctea FAMILAC

PAÍS	Ecuador
REGIÓN	Sierra
PROVINCIA	Chimborazo
CANTÓN	Chambo
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	01° 42' 32" Latitud Sur 78° 35' 32" Longitud Occidental
ALTITUD	2780 m.s.n.m

Fuente: GOOGLE MAPS, 2018

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

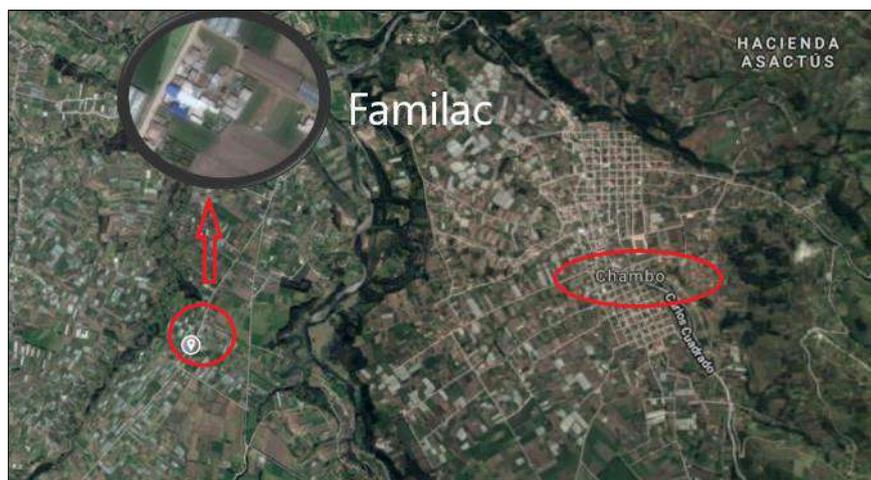


Figura 1-3: Ubicación geográfica de la industria láctea FAMILAC

Fuente: GOOGLE MAPS, 2018.

3.2 Ingeniería del proyecto

3.2.1 Tipo de estudio

El presente proyecto es de tipo técnico-investigativo:

Investigativo: La electrocoagulación es un método moderno para el tratamiento de aguas que utiliza como reactivo a los electrones provenientes de una fuente de energía, estos electrones ingresan a la celda produciendo reacciones de oxidación y reducción. En la presente investigación se realizaron pruebas de tratabilidad en el laboratorio con la finalidad de encontrar las mejores condiciones de operación, obteniendo resultados alentadores en la remoción de contaminantes.

Técnico: Con las mejores condiciones de operación y el caudal máximo de agua residual se efectuó el dimensionamiento del electrocoagulador tomando en consideración variables como: distribución de electrodos, intensidad de corriente y tiempo de tratabilidad.

3.2.2 Metodología

Para llevar a cabo la presente investigación de tipo técnico, se inició principalmente con la revisión bibliográfica sobre tratamientos de aguas residuales por electrocoagulación y su respectivo dimensionamiento, con la información obtenida se procedió al dimensionamiento del sistema electrocoagulación a escala de laboratorio que consta de una celda de reacción, fuente de corriente eléctrica y electrodos metálicos, en el sistema de EC se realizaron pruebas de tratabilidad modificando variables como: intensidad de corriente, distribución de electrodos y tiempo de tratamiento, seguidamente se eligió el tratamiento con los mejores porcentajes de remoción para el dimensionamiento del electrocoagulador a escala industrial, los experimento se realizó en el laboratorio de aguas de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.

a) Método Deductivo

Para la presente investigación se recolecto información relevante sobre tratamiento de aguas por electrocoagulación, encontrándose que la mayor aplicabilidad de este método se encuentra en la industria papelera, pinturas, alimenticias etc. obteniendo buenos porcentajes de remoción de los contaminantes.

b) Método Inductivo

A partir de la caracterización inicial del afluente y la caracterización final de los tratamientos, se elige el tratamiento que elimine mayoritariamente los contaminantes y que cumpla con la normativa, con el tratamiento que cumpla los requisitos antes mencionados, se realiza los cálculos matemáticos para el dimensionamiento del equipo de electrocoagulación y de esta manera pueda ser instalada en la industria láctea “FAMILAC”.

c) Método Experimental

Este método electroquímico para el tratamiento de aguas residuales es de gran importancia para el desarrollo del proyecto, mediante la realización de varias pruebas de tratabilidad, las mismas que se realizaron en el laboratorio de aguas residuales de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, utilizando una celda electroquímica a escala piloto para el tratamiento del afluente y obtener un agua tratada, asegurando de esta manera la validez del sistema de electrocoagulación.

3.2.3 Muestreo de aguas residuales

Debido a que las características del agua residual producido en la industria FAMILAC presenta mucha variabilidad según el proceso productivo, esto debido al horario producción de queso, leche y yogurt es variada y cada proceso presenta un efluente distinto, por tal motivo en la presente investigación se trabajó con efluente lácteo provenientes del lavado de tanques de homogenización, intercambiadores de calor (esterilizador, pasteurizador) porque esta actividad se realiza diariamente y representa el mayor consumo de agua limpia. Para el muestreo del efluente se aplicó la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2169:98 (monitoreo, muestreo y conservación previo a la caracterización) utilizando los equipos de protección personal.

El tipo de muestreo fue de tipo compuesto, es decir la combinación de muestras individuales recolectadas a la salida de los tanques de proceso donde se descarga el agua, tomando en consideración que este proceso se realiza diariamente después de cada producción y consume una gran cantidad de agua limpia. Estas muestras se recolectaron en intervalos irregulares de tiempo, cada vez que se producía la descarga del agua residual, observando las características organolépticas como: color, olor y otras como partículas que se encuentran suspendidas.

Tabla 2-3: Planificación de muestreo

Lugar de muestreo	Nº de descarga	Tiempo de descarga	Etapas del proceso	Volumen de agua residual generado (l)	%	Volumen de agua residual recolectado
TANQUES DE LAVADO	1	09:30 10:00	Limpieza de tanques de proceso	1900	50	1
	2	11:30 12:00	Limpieza de tanques de proceso	2100	50	1
Volumen Total				4000	100	2

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

El muestreo se realizó los días martes, jueves y sábado, debido a que la máxima producción del caudal se da el día jueves, por tanto, mayor grado de contaminación. Posterior al muestreo el agua recolectada fue transportada al laboratorio para su respectivo análisis.

3.2.4 Caracterización fisicoquímica del agua residual

En general, las aguas presentan un aspecto turbio y un color blanquecino lechoso. Destaca la presencia de sólidos que decantan al dejar el agua reposar y desprenden un olor dulce característico del yogurt.

Para la caracterización inicial se tomó una muestra representativa y se depositó en un envase de 1 L, la conservación y el transporte se realizó de acuerdo a lo establecido en la norma INEN 2169:98. Las muestras se caracterizaron de acuerdo a la Tabla 8 Límites de Descarga al Sistema de Alcantarillado Público del TULSMA (ver anexo F). En la presente investigación se trabajó con 10 parámetros considerados los más representativos, los que se muestran en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Límites máximo permisible de descarga al sistema de alcantarillado público

Parámetro	Símbolo	Unidad	L.M.P
ACEITES Y GRASAS	Sust. solubles en hexano	mg/l	70
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (5 DÍAS)	DBO ₅	mg/l	250
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	DQO	mg/l	500
NITRÓGENO TOTAL KJEDAHN	N	mg/l	60
POTENCIAL DE HIDRÓGENO	pH	-	6-9
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	SD	mg/l	20
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	SST	mg/l	220
SÓLIDOS TOTALES	ST	mg/l	1600
SULFUROS	S	mg/l	1
TEMPERATURA	°C	-	<40

Fuente: TULSMA: Tabla 8 descarga al sistema de alcantarillado público

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

3.2.5 Métodos y técnicas

Las técnicas utilizadas en esta investigación son: in situ y las técnicas de laboratorio, dentro de las cuales se presentan diferentes métodos de medición según el parámetro a caracterizar.

- **Técnicas in situ**

Generalmente estas técnicas se realizan en el lugar de muestreo, por la gran inestabilidad que presentan, como ejemplo principal tenemos la temperatura y el caudal.

- Temperatura

En la presente investigación la temperatura, no es de mayor relevancia, debido a que la temperatura del agua residual tiene un valor de 30 °C y cumple la normativa (< 40°C). Cabe mencionar que el agua residual es almacenada para las pruebas de tratabilidad y disminuye hasta alcanzar la temperatura ambiente. En cambio, en el tratamiento por electrocoagulación existe un leve incremento de temperatura, esto se debe a la transformación de energía eléctrica en calorífica, debido a la resistencia que presenta los electrodos metálicos.

- Caudal

Para determinar el caudal del agua residual se utilizó el método volumétrico como se menciona en la Tabla 4-3. Se tomó esta decisión debido a que la empresa no almacena el agua residual y lo desecha directamente en el alcantarillado público. La medición se realizó durante una semana de trabajo, para ello el fluido se recolectó durante el lavado de tanques (tanques de almacenamiento, pasteurizadores o esterilizadores de la leche) en un recipiente plástico de 10 litros de capacidad, cronometrando el tiempo respectivamente.

Tabla 4-3: Medición del caudal

Fundamento	Materiales	Técnica	Cálculos
Se define como el volumen del líquido mediante un tiempo transcurrido.	Balde volumétrico Cronómetro	Llenar el balde con el agua residual, medimos el tiempo que se demora en llenar. Repetimos el procedimiento unas cinco veces.	El caudal se calcula con la relación de volumen sobre el tiempo.

Fuente: STANDARD METHODS, edición 17

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

- **Técnicas de laboratorio**

Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de Servicios Analíticos Químicos y microbiológicos (SAQMIC) y Laboratorio de Análisis Técnicos de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo con la finalidad de garantizar los resultados, ahí se realizó la caracterización del agua residual y sus respectivos tratamientos y para ello se utilizó los métodos estandarizados que se detallan en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3: Métodos usados en el análisis del agua residual

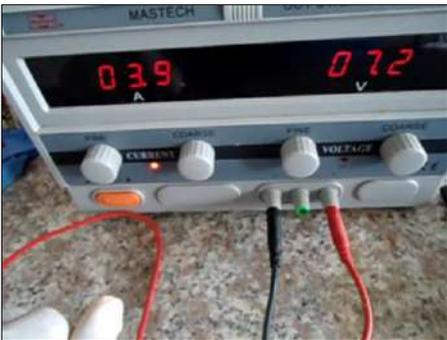
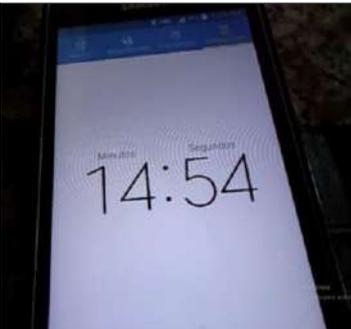
Parámetro	Unidad	Método
ACEITES Y GRASAS	mg/l	5520-B
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (5 DÍAS)	mg/l	5210-B
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	mg/l	5220-C
NITRÓGENO TOTAL KJEDAHN	mg/l	4500-NORG-C
POTENCIAL DE HIDRÓGENO	-	4500-H ⁺ -B
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	mg/l	2540-B
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	mg/l	2540-B
SÓLIDOS TOTALES	mg/l	2540-B
SULFUROS	mg/l	4500-S-E
TEMPERATURA	°C	2550-B
TURBIDEZ	NTU	2130-B
CONDUCTIVIDAD	µs/cm	2510-B
SOLIDOS DISUELTOS TOTALES (TDS)	mg/l	2540-C

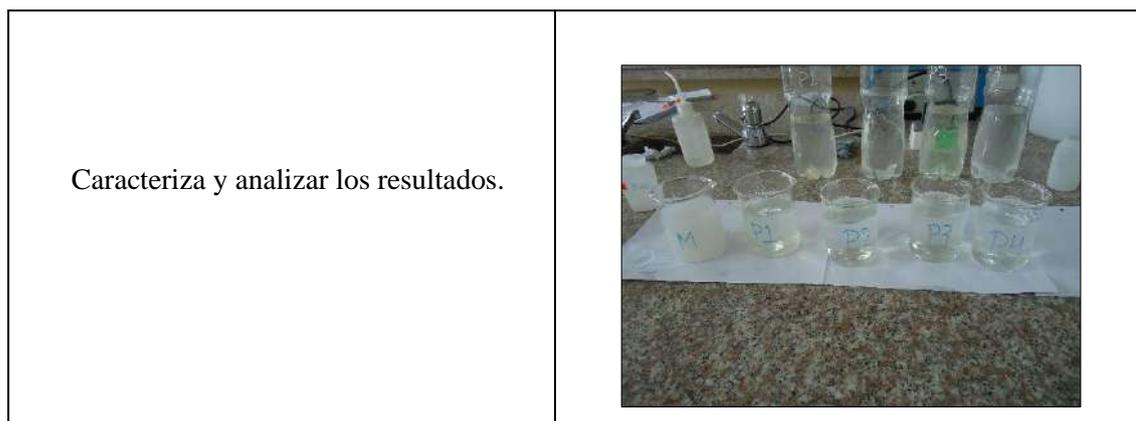
Fuente: Métodos Normalizados. APHA, AWWA, WPCF 17 ed y HACH
Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

3.2.6 Procedimiento para pruebas de electrocoagulación a nivel de laboratorio

Tabla 6-3: Procedimiento para las pruebas de electrocoagulación a nivel de laboratorio.

<p>Colocar los electrodos en forma vertical y añadir 1.98 litros de agua residual en la celda de pruebas.</p>	
---	--

<p>Realizar el cableado sujetando el polo positivo (+) al ánodo de sacrificio y el polo negativo (-) al cátodo.</p>	
<p>Encender la fuente de poder y modificar la intensidad que se desea aplicar a la celda.</p>	
<p>Cronometrar el tiempo de tratamiento.</p>	
<p>Después de cada lote de electrocoagulación dejar sedimentar por un periodo de 1 hora y seleccionar los tratamientos con menor tiempo de sedimentación y flotación.</p>	



Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

3.2.7 Pruebas de tratabilidad por electrocoagulación.

Los tratamientos por electrocoagulación se llevaron a cabo por lotes, sin ser necesaria la adición de compuestos químicos adicionales, y las variables son: distribución de electrodos, intensidad de corriente (A) y tiempo de tratamiento (min). Se realizó 12 pruebas de tratabilidad modificando las variables antes mencionadas como se muestra en la Tabla 7-3.

Tabla 7-3: Pruebas de electrocoagulación

Tratamientos	Distribución de electrodos Cátodos (-) y Ánodos (+)	Intensidad de corriente (A)	Voltaje (V)	Tiempo (min)
T1	Fe-Fe	3	3.9	15
T2	Al-Al	3	3.7	15
T3	Fe-Al	3	4.7	15
T4	Al-Fe	3	2.9	15
T5	Fe-Fe	2	4.3	15
T6	Al-Al	2	4.1	15
T7	Fe-Al	2	4.1	15
T8	Al-Fe	2	4.3	15
T9	Fe-Fe	4	6.7	10
T10	Al-Al	4	6.8	10
T11	Fe-Al	4	5.5	10
T12	Al-Fe	4	6.1	10

Fuente: SAQMIC (Servicios Analíticos Químicos y microbiológicos)

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

3.2.8 Dimensionamiento del reactor de electrocoagulación para un caudal de 4000 l/día

3.2.8.1 Cálculos matemáticos para celda de pruebas

- Cálculo del volumen total de la celda de pruebas, (V_T , m^3)

El volumen del reactor de pruebas se calcula mediante la ecuación 1-3:

$$V_T = l * H * a \quad \text{Ecuación: 1-3}$$

Dónde:

- l : longitud del reactor (m)
- H : altura total del reactor (m)
- a : ancho del reactor (m)

$$V_T = 0.115 \text{ m} * 0.21 \text{ m} * 0.10 \text{ m}$$

$$V_T = 0.115 \text{ m} * 0.21 \text{ m} * 0.10 \text{ m}$$

$$V_T = 2.42 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

- Cálculo del área de los electrodos sumergidos en la celda de pruebas, (A_e , m^2)

$$A_e = a_e * h_e * n_e \quad \text{Ecuación: 2-3}$$

Dónde:

- a_e : ancho del electrodo (m)
- h_e : altura de los electrodos sumergidos (m)
- n_e : número de electrodos

$$A_e = 0.098 \text{ m} * 0.205 \text{ m} * 8$$

$$A_e = 0.161 \text{ m}^2$$

- Cálculo del volumen de los electrodos sumergidos en la celda pruebas, (V_e , m^3)

Según Cambo (2017), establece que el volumen ocupado por los electrodos en la celda de pruebas se calculó mediante la ecuación 3-3.

$$V_e = esp_e * a_e * h_e * n_e \quad \text{Ecuación: 3-3}$$

Dónde:

- esp_e espesor de los electrodos (m)
- a_e ancho de los electrodos (m)
- h_e altura de los electrodos sumergidos (m)
- n_e número de electrodos

$$V_e = 0.003 \text{ m} * 0.098 \text{ m} * 0.205 \text{ m} * 8$$
$$V_e = 4.82 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

- Cálculo del volumen del fluido ocupado en la celda de pruebas, (V_w , m^3)

El volumen neto ocupado por el fluido (V_w) fue determinado por la diferencia entre el volumen total (V_T) de la celda y el volumen de los electrodos (V_e) sumergido en la celda, expresado en la ecuación 4-3:

$$V_w = V_T - V_e \quad \text{Ecuación: 4-3}$$

$$V_w = 2.42 \times 10^{-3} \text{ m}^3 - 4.82 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$
$$V_w = 1.94 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

- Densidad de corriente experimental, (D_{corr} , A/m^2)

La densidad de corriente se determina con la ecuación 5-3 (Guanoluiza , 2013, p. 69) y es igual a la intensidad experimental (tratamiento 2) que fue de 3 amperios por el área de los electrodos sumergidos en la celda.

$$D_{corr} = \frac{I}{A_e} \quad \text{Ecuación: 5-3}$$

Dónde:

- I : intensidad de corriente (A)
- A_e : área de los electrodos sumergidos en la celda (m^2)

$$D_{corr} = \frac{3 A}{0.161 m^2}$$

$$D_{corr} = 18.633 A/m^2$$

- Cálculos de las relaciones dimensionales en la celda de pruebas

Según Guanoluiza (2013), establece relaciones matemáticas que posteriormente serán utilizadas para el dimensionamiento del electrocoagulador a escala industrial.

Relación entre el volumen del fluido ocupado en el reactor (V_w) y el volumen total (V_T) del reactor.

$$\frac{V_w}{V_T} = \frac{1.94 \times 10^{-3} m^3}{2.42 \times 10^{-3} m^3}$$

$$V_w = 0.80 V_T$$

Ecuación: 6-3

Relación entre la longitud (l) y el ancho(a) del reactor.

$$\frac{l}{a} = \frac{0.115 m}{0.10 m}$$

$$l = 1.15 a$$

Ecuación: 7-3

Relación entre la altura total (H) y el ancho (a) del reactor.

$$\frac{H}{a} = \frac{0.21 m}{0.10 m}$$

$$H = 2.1 a$$

Ecuación: 8-3

Relación entre el espacio bajo el borde inferior de los electrodos (b) y el nivel de agua en el reactor que es igual la altura del reactor (H).

$$\frac{b}{H} = \frac{5 \times 10^{-3} m}{0.21 m}$$

$$b = 0.024 H$$

Ecuación: 9-3

3.2.8.2 Dimensionamiento del reactor a escala industrial

- Cálculo del volumen de agua a ser tratada, (V_{WR}, m^3)

Según Guanoluiza (2013), el volumen de agua a ser tratada (V_{WR}) en la celda de electrocoagulación se determina con la ecuación 10-3, utilizando el tiempo de residencia experimental (tratamiento 2) que fue de 15 minutos (0.25 h) y el caudal máximo de producción.

$$V_{WR} = t_r \times Q \times f \quad \text{Ecuación: 10-3}$$

Dónde:

t_r : tiempo de residencia experimental (h)

Q : caudal de diseño (L/h)

f : factor de seguridad (1.3)

$$V_{WR} = 0.25 \text{ h} \times 165.6 \text{ L/h} \times 1.3$$

$$V_{WR} = 53.82 \text{ L}$$

$$V_{WR} = 0.05382 \text{ m}^3$$

- Cálculo del volumen total del reactor de electrocoagulación, (V_{TR} , m^3)

Para determinar el volumen total del reactor de electrocoagulación, reemplazamos el volumen de agua a ser tratada (V_{WR}) en la relación 6-3 del reactor prototipo.

$$V_w = 0.80 V_T \quad \text{Ecuación: 6-3}$$

$$V_{TR} = \frac{0.05382 \text{ m}^3}{0.80}$$

$$V_{TR} = 0.06728 \text{ m}^3$$

- Cálculo del ancho, altura y longitud del reactor, (a_R , H_R , l_R , m).

Al reemplazando el volumen total calculado (V_{TR}) y las relaciones matemáticas 7-3 y 8-3 en la ecuación 1-3, se determina en ancho del reactor a_R como menciona (Guanoluiza, 2013,p. 133).

$$V_{TR} = l * H * a \quad \text{Ecuación: 1-3}$$

$$V_{TR} = 1.15 a * 2.1 a * a$$

$$0.06728 \text{ m}^3 = 2.42 a^3$$

$$a_R = 0.3029 \text{ m}$$

Reemplazando el ancho del reactor (a_R) en la ecuación 7-3 y 8-3 se calcula las dimensiones restantes.

$$l = 1.15 a$$
$$l = 1.15 \times 0.3029 \text{ m}$$
$$l_R = 0.3483 \text{ m}$$

Ecuación: 7-3

$$H = 2.1 a$$
$$H = 2.1 \times 0.3029 \text{ m}$$
$$H_R = 0.6361 \text{ m}$$

Ecuación: 8-3

- Cálculo de las dimensiones de los electrodos metálicos

Para determinar las dimensiones de los electrodos se definen de acuerdo a la figura 2-3, tal como menciona (Guanoluiza, 2013,p. 134).

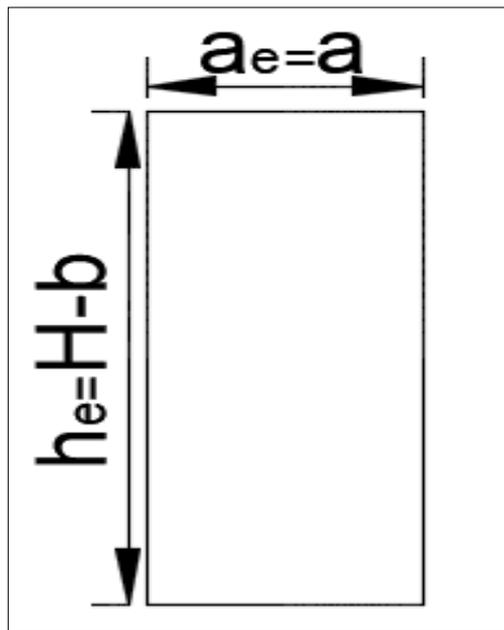


Figura 2-3: Dimensiones de los electrodos en función de las medidas del reactor
Realizado por: Tenelema, Ernesto; 2018.

En la figura se observa que fue necesario aplicar la relación 9-3 para establecer las dimensiones de los electrodos.

$$b = 0.024 H$$

Ecuación: 9-3

$$b = 0.024 * 0.6361 \text{ m}$$

$$b_R = 0.015 \text{ m}$$

Hay que tomar en consideración que el ancho de reactor es igual al ancho del electrodo, y la altura del electrodo se calcula con la ecuación 11-3.

$$a_{eR} = a_R = 0.3029 \text{ m}$$

$$h_{eR} = H_R - b_R$$

Ecuación: 11-3

$$h_{eR} = 0.6361 \text{ m} - 0.015 \text{ m}$$

$$h_{eR} = 0.6211 \text{ m}$$

Con la finalidad de sujetar los electrodos con los lagartos, se optó por incrementar la altura de los electrodos de 0.62 a 0.65 m

- Cálculo del número de electrodos, (N_{eR})

Según Alvear y Olivo (2018), el número de electrodos se determina mediante la ecuación 12-3.

$$N_{eR} = \frac{\text{Largo de la celda} - 2 * \text{Distancia electrodos a cara lateral}}{\text{Distribución espacial} + \text{Espesor de electrodos}} \quad \text{Ecuación: 12-3}$$

$$N_e = \frac{34.83 \text{ cm} - 2 * 1 \text{ cm}}{1 \text{ cm} + 0.3 \text{ cm}}$$

$$N_e = 26 \text{ electrodos}$$

De un total de 26 electrodos calculados, 13 de ellos trabajaran como ánodos y 13 como cátodos.

- Cálculo del área de los electrodos del electrocoagulador, (A_{eR} , m^2)

$$A_{eR} = a_{eR} * h_{eR} * n_{eR}$$

Ecuación: 2-3

Donde:

a_{eR} : ancho de los electrodos (m)

h_{eR} : altura de los electrodos sumergidos (m)

N_{eR} : número de electrodos

$$A_{eR} = 0.3029 \text{ m} * 0.6211 \text{ m} * 26$$

$$A_{eR} = 4.89 \text{ m}^2$$

- Cálculo de la intensidad de corriente eléctrica, (I, A)

Para calcular la intensidad de corriente se despeja la intensidad de corriente de la ecuación 5-3 y se reemplaza las dimensiones de los electrodos metálicos diseñados y la densidad de corriente obtenida en la fase de pruebas (T2).

$$D_{corr} = \frac{I}{A_{eR}} \quad \text{Ecuación: 5-3}$$

Dónde:

D_{corr} : densidad de corriente en fase de pruebas (A)

A_{eR} : área de los electrodos del electrocoagulador (m^2)

$$I = D_{corr} * A_{eR}$$

$$I = 18.633 \frac{\text{A}}{\text{m}^2} * 4.89 \text{ m}^2$$

$$I = 91.12 \text{ A}$$

- Voltaje del electrocoagulador, (V_R , V)

Para determinar el voltaje que utilizará el reactor de electrocoagulación se aplica la ecuación 13-3 (ley de ohm) que establece una relación entre la intensidad de corriente y la resistencia de un circuito cerrado (Alvear,2018, p.5).

$$I = \frac{V}{R} \quad \text{Ecuación: 13-3}$$

Para relacionar la intensidad de corriente y voltaje, se decidió aplicar intensidades de corriente al sistema de electrocoagulación de 1 a 10 A, y se observó que la intensidad y el voltaje son proporcionales como se especifica en la Tabla 8-3, estos datos fueron graficados (grafico 1-3), con la finalidad de encontrar una función que nos permita relacionar estas dos variables.

Tabla 8-3: Voltaje obtenido experimentalmente

Intensidad de corriente (A)	Voltaje (V)
1	1.4
2	2.2
3	2.5
4	3.2
5	3.4
6	4.2
7	4.5
8	5.2
9	5.1
10	6.2

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

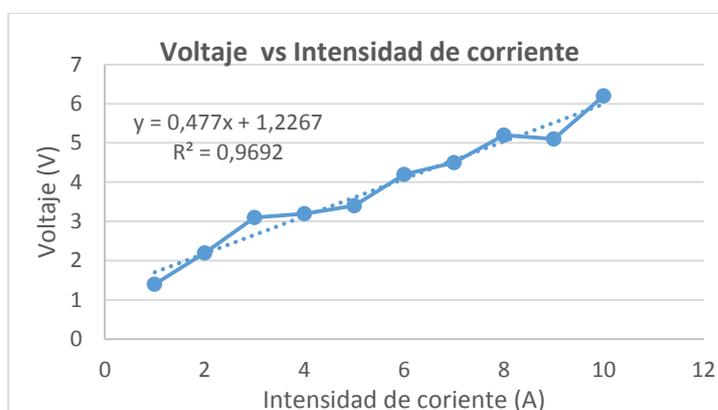


Gráfico 1-3: Voltaje (V) vs Intensidad (I)

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

$$y = 0.477 x + 1.2267$$

Ecuación: 14-3

Con la función obtenida, el valor de (y) representa el voltaje y el valor (x) la intensidad de corriente. Reemplazando la intensidad de corriente calculada anteriormente en la ecuación 14-3, se calcula el voltaje que utilizara el reactor de electrocoagulación.

$$V_R = 0.477 * (91.12 A) + 1.2267$$

$$V = 44.69 V$$

- Potencia para el reactor, (P_R , kW)

Según Cambo (2017), establece que para determinar la potencia que utilizará el electrocoagulador se aplica la ecuación 15-3.

$$P_R = \frac{I \times V}{1000} \quad \text{Ecuación: 15-3}$$

Dónde:

I : intensidad del electrocoagulador (A)

V : voltaje del electrocoagulador (V)

$$P_R = 91.12 \text{ A} \times 44.69 \text{ V} \times \frac{1 \text{ KW}}{1000 \text{ W}}$$

$$P_R = 4.08 \text{ kW}$$

3.2.8.3 Dimensionamiento del tanque de sedimentación

Para complementar el sistema de tratamiento de agua, se dimensionó un sedimentador circular que consta de una fracción cilíndrica en la parte superior y en el fondo un cono para facilitar la sedimentación.

- Cálculo del volumen del cono truncado, (V_C , m^3)

Para determinar el volumen del cono se aplica la ecuación 16-3 (Ramos, 2017), asumiendo un diámetro superior de 1.50 m, un diámetro inferior de 0.20 m y una altura de 0.65 m.

$$V_C = \frac{\pi * h_c * (r_s^2 + r_i^2 + r_s * r_i)}{3} \quad \text{Ecuación: 16-3}$$

Dónde:

h_c : altura del cono (m)

r_s : radio superior (m)

r_i : radio inferior (m)

$$V_C = \frac{\pi * 0.65 \text{ m} * ((0.75 \text{ m})^2 + (0.10 \text{ m})^2 + 0.75 \text{ m} * 0.10 \text{ m})}{3}$$

$$V_C = \frac{\pi * 0.65 \text{ m} * (0.57 \text{ m}^2)}{3}$$

$$V_C = 0.441 \text{ m}^3$$

- Ángulo del cono, (θ_c , °)

$$\theta_c = \text{Arco tan} \left(\frac{h_c}{r_s - r_i} \right) \quad \text{Ecuación: 17-3}$$

$$\theta_c = \text{Arco tan} \left(\frac{0.65 \text{ m}}{0.75 \text{ m} - 0.10 \text{ m}} \right)$$

$$\theta_c = 45^\circ$$

- Cálculo del volumen del tanque cilíndrico, (V_{TC} , m^3)

Tabla 9-3: Criterios para el dimensionamiento de un sedimentador circular

Parámetro	Intervalo	Valor típico
PROFUNDIDAD, m	3-7	5
DIÁMETRO, m	3-61	12-45
PENDIENTE DEL FONDO, m/m	0.60-0.17	0.08
VELOCIDAD DE BARREDOR	0.02-0.05	0.03

Fuente: (Crites y Tchobanoglus, 2000)

Obedeciendo los criterios establecidos por Crites y Tchobanoglous en la Tabla 9-3, el rango de profundidad de un sedimentador circular se encuentra de 3 a 7 m, para el diseño se utilizó el valor mínimo que es 3 m.

$$V_{TC} = \pi * r_s^2 * h_{TC} \quad \text{Ecuación: 18-3}$$

Dónde:

V_{TC} : volumen del tanque cilíndrico (m^3)

$$V_{TC} = \pi * (0.75 \text{ m})^2 * (3 \text{ m})$$

$$V_{TC} = 5.301 \text{ m}^3$$

- Volumen total del sedimentador, (V_s , m^3)

$$V_s = V_{TC} + V_C \quad \text{Ecuación: 19-3}$$

Dónde:

V_{TC} : volumen del tanque cilíndrico (m^3)

V_C : volumen del cono (m^3)

$$V_S = 5.301 \text{ m}^3 + 0.441 \text{ m}^3$$

$$V_S = 5.742 \text{ m}^3$$

- Cálculo de reparto central en el tanque de sedimentación, (R_C , m)

Según Barragán (2015), establece que para determinar la altura de reparto, se considera el 25 % del diámetro del tanque de sedimentación.

$$R_C = 0.25 * \Phi$$

Ecuación: 20-3

Dónde:

Φ : diámetro del tanque de sedimentación
(m)

$$R_C = 0.25 * 1.5 \text{ m}$$

$$R_C = 0.375 \text{ m}$$

- El tiempo de retención teórico, (Tr_{TS} , h)

$$Tr_{TS} = \frac{V_{TS}}{Q}$$

Ecuación: 21-3

Dónde:

V_{TS} : volumen del tanque de sedimentación,
(m^3)

Q : caudal de diseño (m^3/h)

$$Tr_{TS} = \frac{5.742 \text{ m}^3}{0.1656 \text{ m}^3/h}$$

$$Tr_{TS} = 3.67 \text{ h}$$

- Cálculo de la altura de reparto, (H_R , m)

Para sedimentadores circulares el rango de reparto se encuentra en un rango de 1/3 y 1/5 (Barragán, 2015) de profundidad, utilizando para el diseño el valor mínimo de 1/3.

$$H_R = \frac{1}{3} \times h_{TC} \quad \text{Ecuación: 22-3}$$

Dónde:

V_{TS} : volumen del tanque de sedimentación,
(m^3)

Q : caudal de diseño (m^3/h)

$$H_R = \frac{1}{3} \times 3 \text{ m}$$

$$H_R = 1 \text{ m}$$

- Carga sobre vertedero de salida, ($m^3/m.d$)

Según Barragán (2015), establece que para determinar la carga sobre los vertederos es necesario aplicar la ecuación 23-3, que relaciona el caudal de diseño y el diámetro del tanque de sedimentación.

$$C_V = \frac{Q}{\pi * \Phi} \quad \text{Ecuación: 23-3}$$

Dónde:

Q : caudal, (m^3/d)

Φ : diámetro del tanque de sedimentación (m)

$$C_V = \frac{4.97 \text{ m}^3/d}{\pi * 3 \text{ m}}$$

$$C_V = 0.30 \text{ m}^3/m.d$$

3.2.8.4 Dimensionamiento del tanque de almacenamiento

Para determinar el volumen del tanque cilíndrico se aplica la ecuación 24-3 (Ramos, 2017), asumiendo una altura de 3 m y un radio de 0.65 m.

$$V_{TA} = \pi * r_s^2 * h_{TC} \quad \text{Ecuación: 24-3}$$

Dónde:

V_{TA} : volumen del tanque de almacenamiento (m^3)

$$V_{TC} = \pi * (0.65 \text{ m})^2 * (3 \text{ m})$$

$$V_{TC} = 3.98 \text{ m}^3 \text{ approx } 4 \text{ m}^3$$

3.2.9 Resultados

3.2.9.1 Resultado de la caracterización físico química del agua residual antes del proceso

Tabla 2-3: Caracterización fisicoquímica del agua residual

Parámetro	Unidad	L.M.P	Muestreo		Promedio	Cumple
			1	2		
ACEITES Y GRASAS	mg/l	70	332.0	100.0	216	NO
DBO5	mg/l	250	2370.0	2660.0	2515	NO
DQO	mg/l	500	2520.0	6320.0	4420	NO
NITRÓGENO TOTAL	mg/l	60	47.0	70.0	58.5	SI
pH	-	6-9	6.43	6.92	6.68	SI
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	mg/l	20	1.9	0.5	2.4	SI
SST	mg/l	220	318	672	495	NO
SÓLIDOS TOTALES	mg/l	1600	2580.0	5200.0	3890	NO
SULFUROS	mg/l	1.0	12.8	0.0	6.4	NO
TEMPERATURA	°C	<40	30	30	30	SI
TURBIDEZ	NTU	-	301.0	320.0	310.5	-

Fuente: SAQMIC (Servicios Analíticos Químicos y microbiológicos)

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

3.2.9.2 Resultados de la medición de caudales

En la Tabla 11-3, se especifica el monitoreo del caudal realizado durante una semana de trabajo en la planta de lácteos FAMILAC que tiene un horario de trabajo de 8:00 am a 15:00 pm.

Tabla 3-3: Caudal de producción durante una semana de trabajo.

Día	Hora	Volumen(L)	Tiempo(min)	Q Caudal (L/min)	Q Caudal (m ³ /h)
LUNES	09:30-10:00	2.52	1	2.52	0.1512
	11:30-12:00	2.32	1	2.32	0.1392
MARTES	09:30-10:00	2.10	1	2.10	0.1260
	11:30-12:00	2.00	1	2.25	0.1200
MIÉRCOLES	09:30-10:00	1.8	1	1.80	0.1080
	11:30-12:00	2.10	1	2.10	0.126
JUEVES	09:30-10:00	2.76	1	2.76	0.1656
	11:30-12:00	2.26	1	2.26	2.26
VIERNES	09:30-10:00	2.34	1	2.34	0.1404
	11:30-12:00	2.50	1	2.50	0.1500
SÁBADO	09:30-10:00	2.22	1	2.22	0.1332
	11:30-12:00	2.46	1	2.46	0.1476

Realizado por: Ernesto Tenelema,2018

En el gráfico 2-3 se observa los caudales producidos durante una semana de labores, observando que el caudal máximo de producción pertenece al día jueves. Para el diseño del electrocoagulador se utilizó este caudal 2.76 L/min (0.046 L/s) debido a que este día tiene mayor producción de afluente y por consiguiente mayor cantidad de contaminantes.

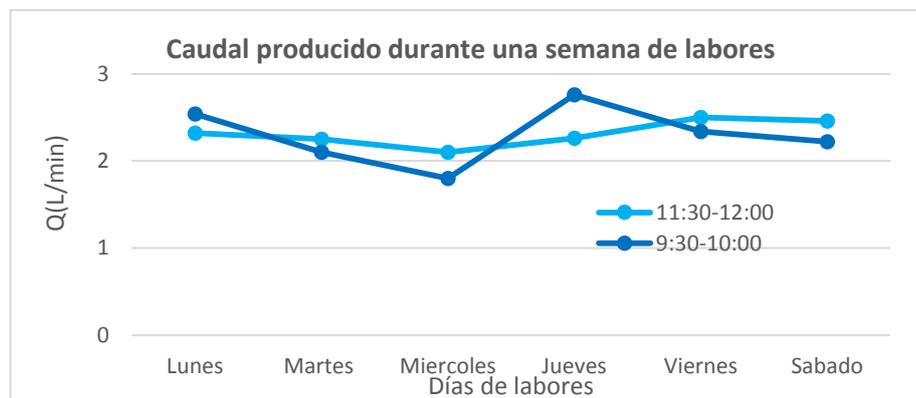


Gráfico 2-3: Caudales producidos durante una semana de labores

Realizado por: Ernesto Tenelema,2018

3.2.9.3 Resultados de las pruebas de tratabilidad por electrocoagulación

De manera general en las pruebas de tratabilidad es evidente la formación de tres regiones, tal como lo menciona (Apaza , 2018, p. 48):

- Región de flotación: En la parte superior donde se acumulan los lodos de flotación y espumas.

- Región de reacciones electroquímicas: En la parte intermedia donde se encuentran sumergidos los electrodos en el efluente.
- Región de precipitación: En la parte inferior donde se observa la precipitación de algunos contaminantes.

Para seleccionar las pruebas de tratabilidad que serán enviadas a caracterización final, se tomó en cuenta el tiempo de sedimentación y flotación (< 1 hora), es decir se eligió los tratamientos con menor tiempo de sedimentación en este caso los tratamientos T1, T2, T8 y T11. Posterior a esto se midió el pH y turbidez como variable de respuesta, como se especifica en la Tabla 12-3.

Los porcentajes de remoción (%R) que se establece mediante la ecuación 25-3.

$$\%R = \left(\frac{C_o - C_t}{C_o} \right) \times 100 \quad \text{Ecuación: 25-3}$$

Donde:

%R: Porcentaje de remoción

C_o : Concentración inicial (mg/l)

C_t : Concentración final (mg/l)

Tabla 4-3: Resultados de turbidez y pH de los tratamientos T1, T2, T8 y T11

Parámetro	Unidad	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 8	Tratamiento 11
pH	Valor	7.67	8.48	7.89	7.32
% REMOCIÓN TURBIDEZ	Valor	96.4	98.4	98.3	97.8

Fuente: SAQMIC (Servicios Analíticos Químicos y microbiológicos)

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

3.2.9.4 Resultado de los porcentajes de remoción de los tratamientos T1, T2, T8 y T11

En la Tabla 5-3 se realiza una comparación entre el agua inicial y final de cada uno de los tratamientos antes mencionados, tomando en consideración todos los parámetros fuera de normativa y presentando los resultados en porcentajes de remoción.

Tabla 5-3: Porcentajes de remoción de los tratamientos T1, T2, T8 y T11

Parámetros	L.M. P	Agua residual	% de remoción por EC							
			T1	% R	T2	% R	T8	% R	T11	% R
ACEITES y GRASAS (mg/l)	70	216	12,6	94,2	15	93,1	13	94,0	11,8	94,5
DBO5 (mg/l)	250	2515	335	86,7	167	93,4	271	89,2	343	86,4
DQO (mg/l)	500	4420	408	90,8	428	90,3	367	91,7	379	91,4
SST (mg/l)	220	495	19	96,2	4	99,2	10	98,0	18	96,4
ST (mg/l)	1600	3890	1196	69,3	996	74,4	1168	70,0	1100	71,7
S (mg/l)	1	6.4	0,8	87,5	1	84,4	1,8	71,9	0,8	87,5
TURBIDEZ	-	310.5	11.1	96.4	4.9	98.4	5.3	98.3	6.7	97.8

Fuente: SAQMIC (Servicios Analíticos Químicos y microbiológicos)
 Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

A continuación, se exponen gráficamente la eliminación de los parámetros fuera de la normativa en cada uno de los tratamientos seleccionados.

Eliminación de aceites y grasas

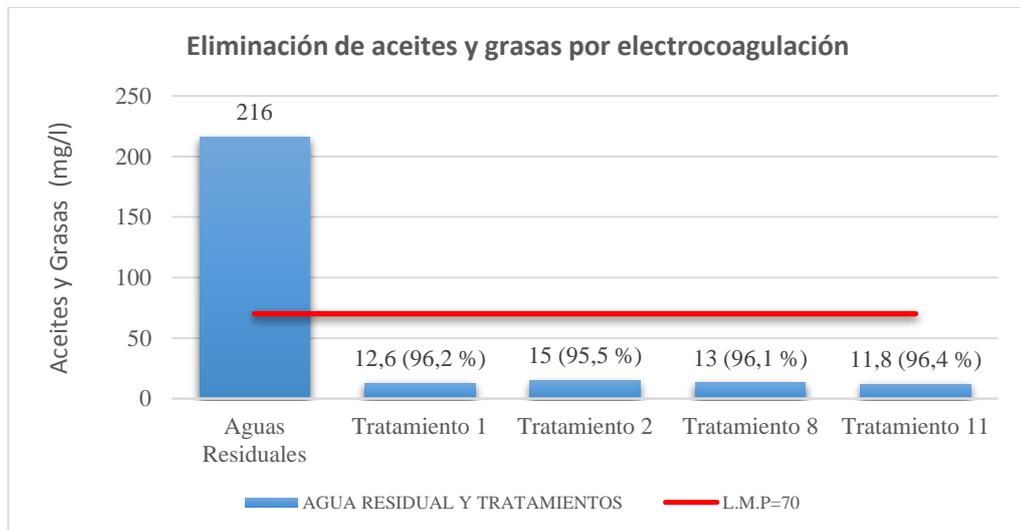


Gráfico 3-3: Eliminación de aceites y grasas para los tratamientos T1, T2, T8 y T11

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

Eliminación de DQO

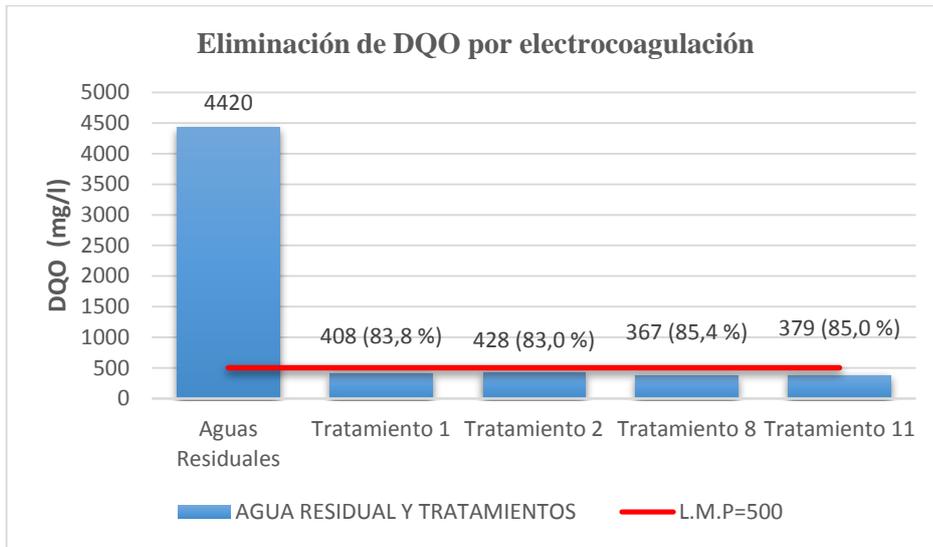


Gráfico 4-3: Eliminación de DQO para los tratamientos T1, T2, T8 y T11

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

Eliminación de SST

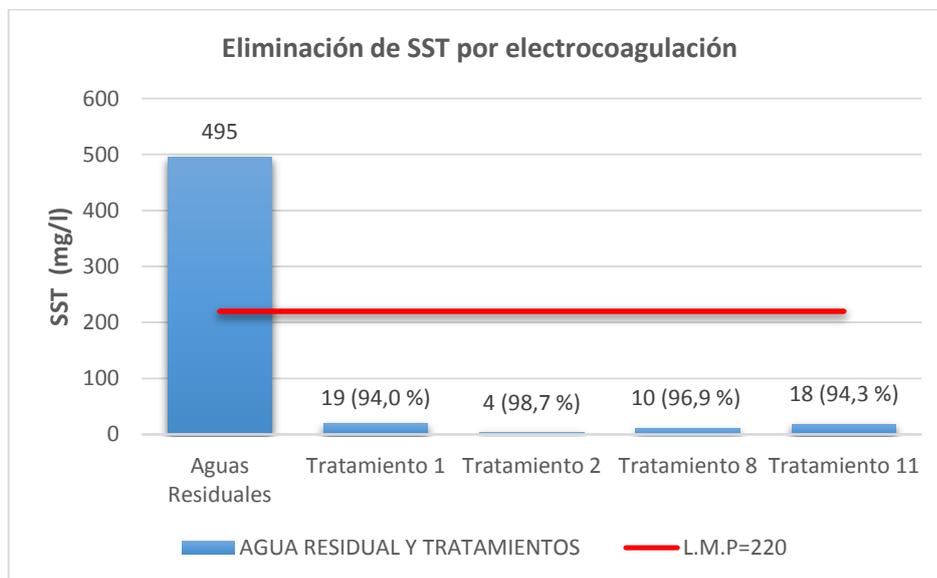


Gráfico 5-3: Eliminación de SST para los tratamientos T1, T2, T8 y T11

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

Eliminación de ST

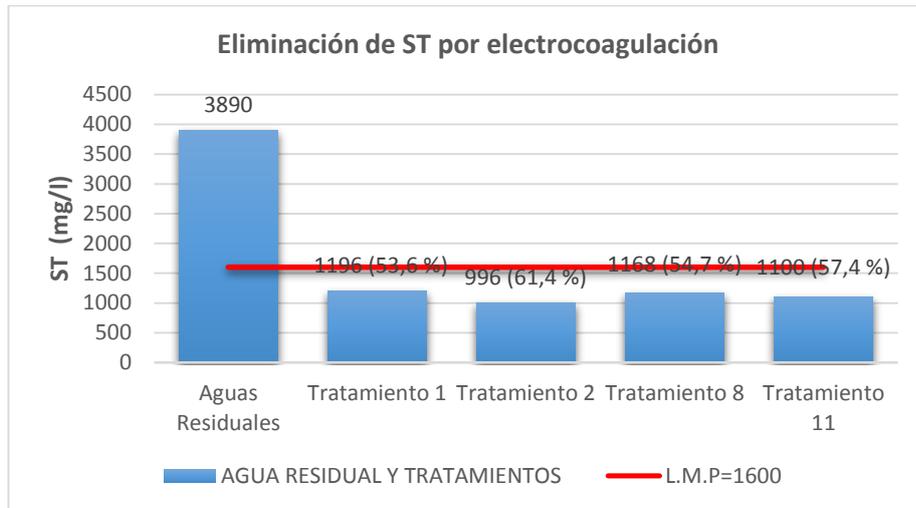


Gráfico 6-3: Eliminación de ST para los tratamientos T1, T2, T8 y T11

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

En los gráficos del 3-3 al 6-3, son analizados parámetros como: Aceites y grasas, DQO y SST y ST de los cuatro tratamientos, dado que tienen un comportamiento similar, es decir tienen elevados porcentajes de remoción y cumplen con la normativa Aceites y grasas (<70mg/l), DQO (<500 mg/l), SST(<220mg/l) y ST(<1600mg/l), con ello concluimos que los cuatro tratamientos son efectivos en la remoción de estos parámetros.

Eliminación de S

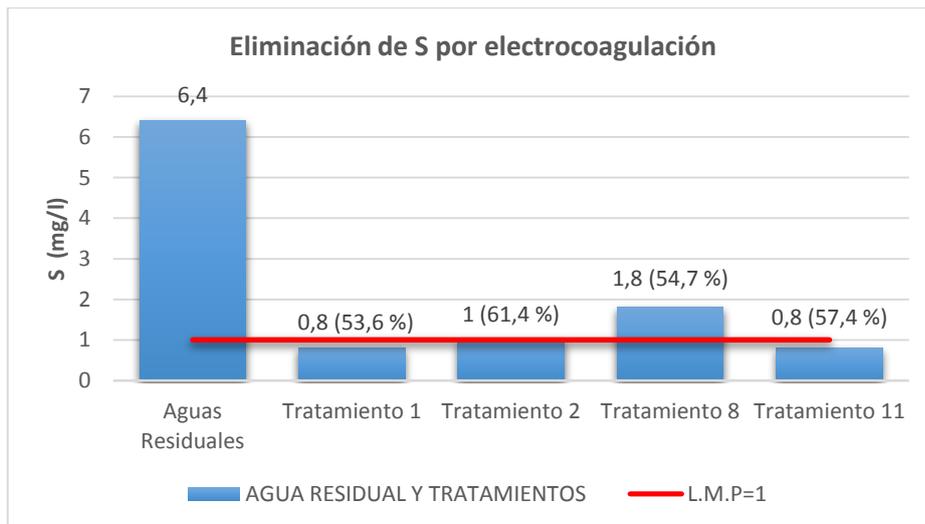


Gráfico 7-3: Eliminación de S para los tratamientos T1, T2, T8 y T11

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

En la grafico 7-3 se aprecia la eliminación de S en cada uno de los tratamientos Además es evidente que los tratamientos 1,2 y 11 cumple con la normativa (< 1 mg/l) quedando descartado solo el tratamiento número 8. Además, cabe mencionar que el tratamiento descartado posee un elevado porcentaje de remoción de S.

Eliminación de DBO₅

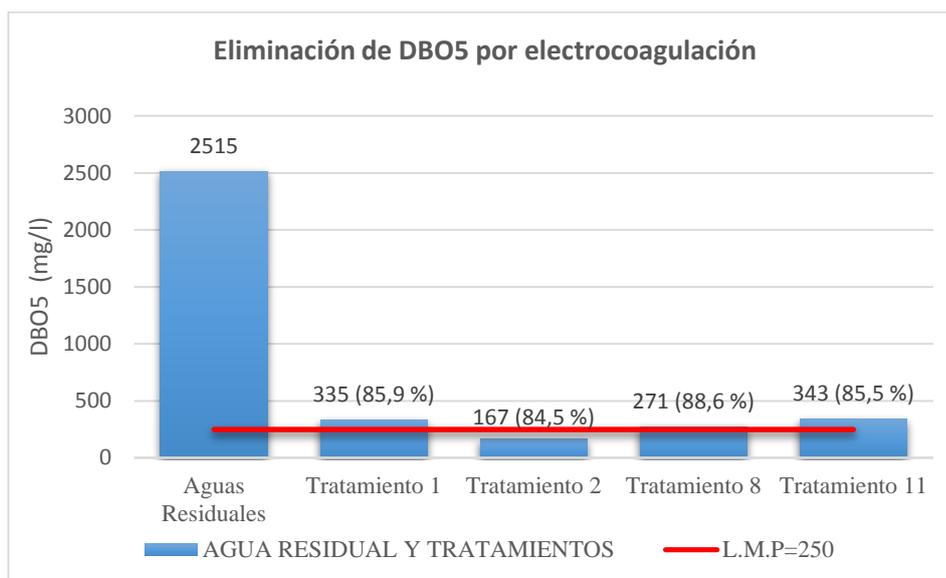


Gráfico 8-3: Eliminación de DBO₅ para los tratamientos T1, T2, T8 y T11

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

En la grafico 8-3 se aprecia la eliminación de DBO₅ en cada uno de los tratamientos observando que solo el tratamiento numero 2 cumple con la normativa (< a 250 mg/l) quedando descartados los tratamientos número 1, 8 y 11. Cabe mencionar que los tratamientos descartados tienen elevados porcentajes de remoción, considerándolos que también son eficiente en la remoción de DBO₅.

3.2.9.5 Resultados de la elección de la prueba de tratabilidad más aceptable

Al analizar cada uno de los tratamientos caracterizados se eligió el tratamiento número 2, debido a que cumple con la normativa ambiental del país, teniendo un porcentaje de remoción de 95.5 % Aceites y Grasas, 84.5 % DBO₅, 83.0 % DQO, 98.7 % SST, 61.4 % ST y 92.2 % S. Los valores óptimos de operación se obtuvieron con una intensidad de corriente I=3 amperios, distribución de electrodos aluminio-aluminio y un tiempo de tratamiento de 15 minutos, estos valores serán utilizados para el dimensionamiento del electrocoagulador a escala industrial.

Análisis de parámetros físicos en el tratamiento numero dos (T2)

Con la finalidad de reducir aún más los costos de tratabilidad, se analizó el tratamiento numero 2 (T2) manteniendo constante la distribución de electrodos (Al-Al) e intensidad de corriente (3A) y variando el tiempo de electrolisis como se especifica en la Tabla 14-3. en estas condiciones se analizó los parámetros más significativos como: turbidez, conductividad, TDS, pH y temperatura (°C).

Tabla 6-3: Variabilidad de parámetros físicos en función del tiempo del (T2)

Tratamientos	Tiempo (min)	Turbidez (NTU)	Conductividad (ms/cm)	TDS (mg/l)	pH	T (°C)
AR	0	310	0.91	480	6.64	21.4
T2-1	5	180	0.85	450	6.69	22.4
T2-2	10	16.88	0.82	440	7.01	23.5
T2-3	15	15.15	0.69	370	7.19	26.8
T2-4	20	7.01	0.63	330	8.25	28.4
T2-5	25	6.61	0.55	290	8.94	29.9
T2-6	30	1490	214	1150	9.03	32.5

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

En los gráficos siguientes se analiza cada uno de los parámetros físicos, expresados en la tabla 15-3.

Variabilidad de turbidez

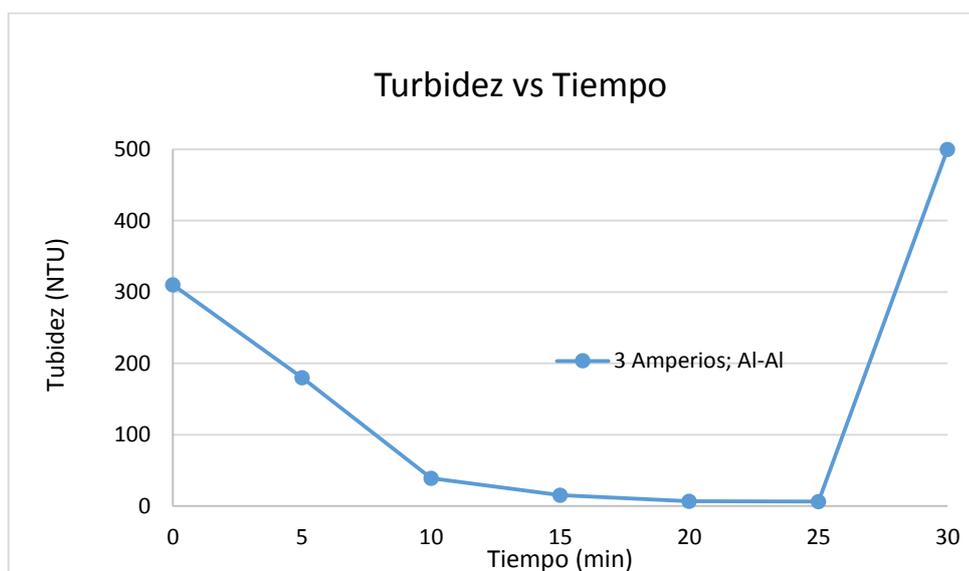


Gráfico 9-3: Variación de la turbidez en función del tiempo

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

Variabilidad de la conductividad

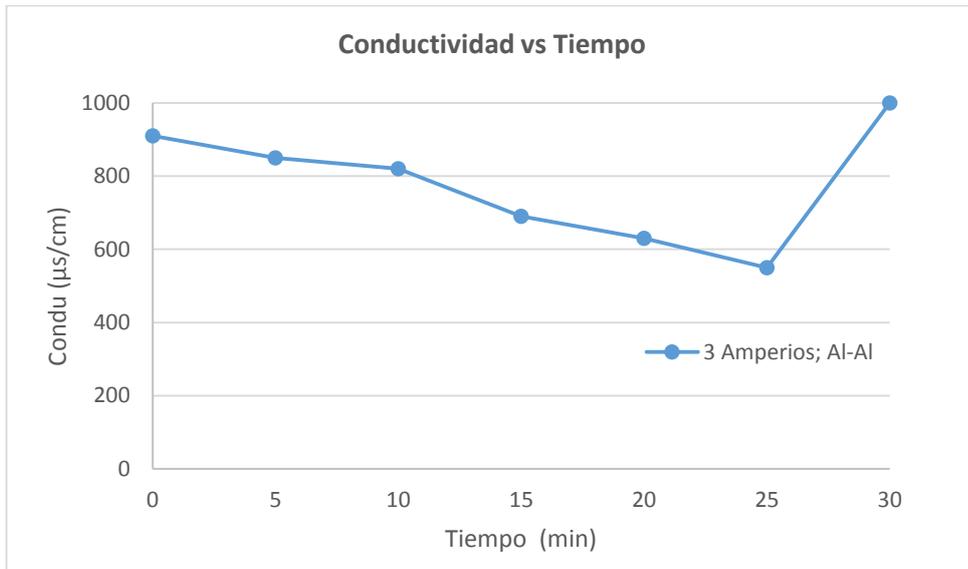


Gráfico 10-3: Variación de la conductividad en función del tiempo

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

Variabilidad de los sólidos totales disueltos

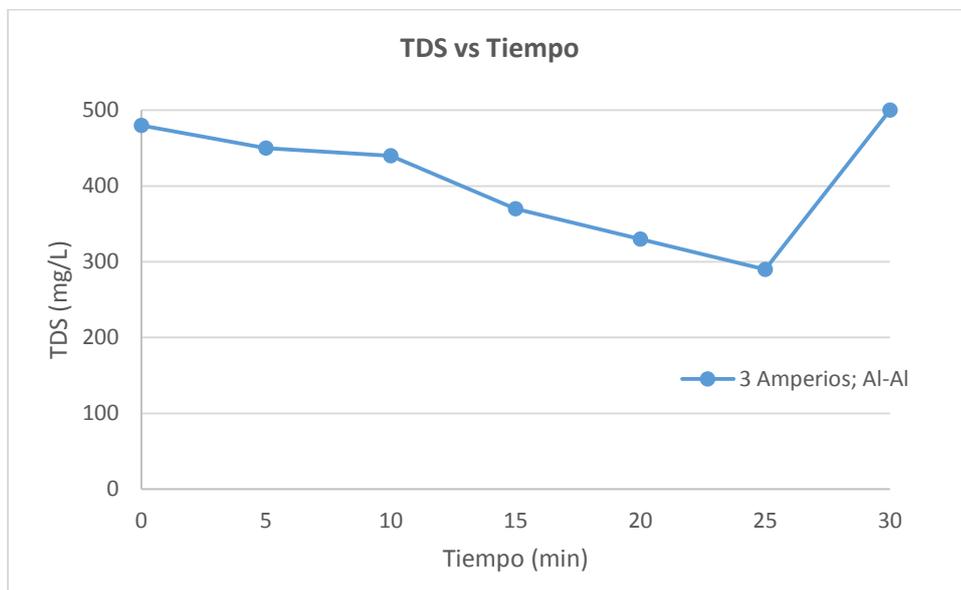


Gráfico 11-3: Variación de sólidos suspendidos en función del tiempo

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

En los gráficos del 9-3 al 11-3, fueron analizados los siguientes parámetros: turbidez, conductividad y TDS, dado que tienen un comportamiento similar, es decir que al incrementar el tiempo de electrolysis disminuyen significativamente hasta un tiempo de 25 minutos, pasado este

tiempo la solución acuosa tiende a saturarse, es decir la cantidad de reactivo es excesiva por la gran cantidad de iones metálicos disueltos en el medio. Pasado este tiempo los parámetros analizados tienden a incrementarse abruptamente.

Variabilidad del pH

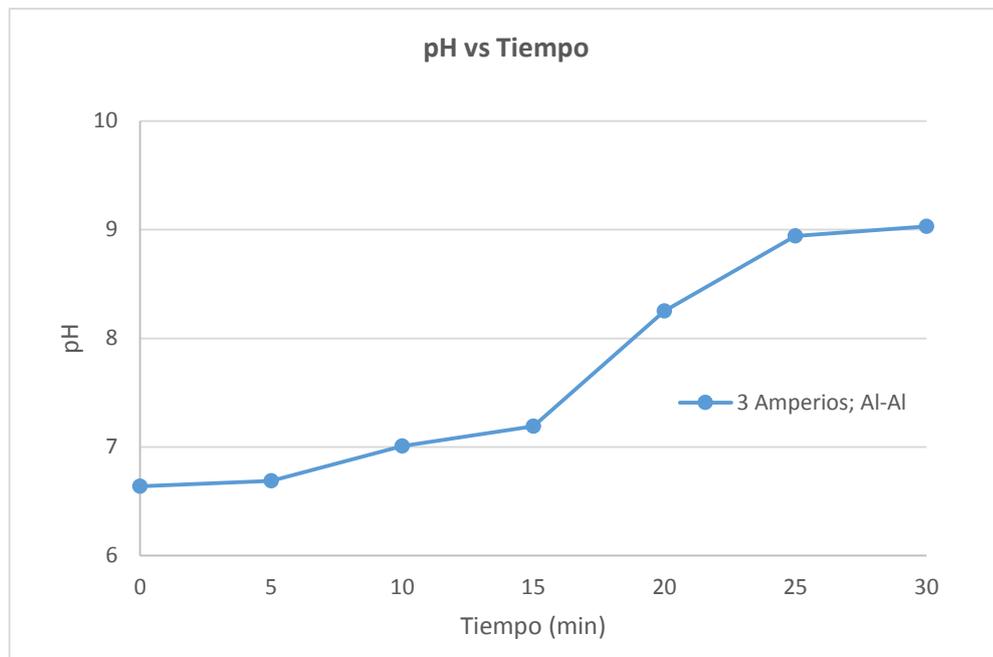


Gráfico 12-3: Variación del pH en función del tiempo

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

En investigaciones realizadas sobre electrocoagulación de aguas residuales se ha determinado que el pH varía durante el tratamiento, en aguas residuales que presenta un carácter ácido como en este caso, el pH tiende a incrementarse (gráfico 12-3) esto se debe a la generación de burbujas de H_2 en el cátodo. También es importante mencionar que a 30 minutos de electrolisis el pH sobrepasa el límite máximo permisible (>9) incumpliendo la normativa.

Variabilidad de la temperatura

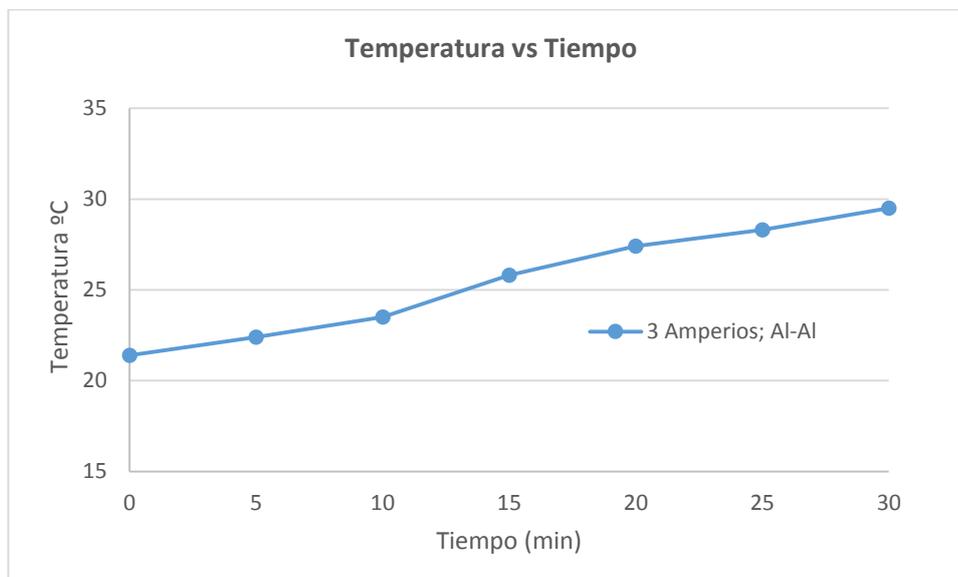


Gráfico 13-3: Variación de la temperatura en función del tiempo

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

En el proceso de electrocoagulación la temperatura es directamente proporcional al tiempo de electrolisis (gráfico 13-3), es decir que al incrementar el tiempo también incrementa la temperatura, esto se debe a la conversión de energía eléctrica en energía calorífica por la resistencia que presentan los electrodos metálicos al paso de la corriente eléctrica

Resultados de análisis físicos del tratamiento numero dos (T2)

En conclusión, al analizar parámetros como la turbidez, conductividad y TDS se observó que disminuyen al incrementar el tiempo de electrolisis (inversamente proporcional) obteniendo una máxima remoción de contaminantes hasta un tiempo de 25 minutos, pasado dicho tiempo la solución tiende a saturarse. Por el contrario, el pH y la temperatura incrementan al aumentar el tiempo de electrolisis (directamente proporcional). Cabe mencionar que a 20 y 25 minutos de electrolisis existe una mayor remoción de contaminantes y al mismo tiempo mayor consumo de energía y electrodos. Por tal motivo se optó por conservar el tratamiento a 15 minutos puesto que a esas condiciones cumple con la normativa, y existe un ahorro en el consumo de energía eléctrica y electrodos.

3.2.9.6 Resultado del dimensionamiento de la planta de tratamiento

Tabla 7-3: Resumen del electrocoagulador

DESCRIPCIÓN	Simbología		Valor	Unidad
DIMENSIONES DEL REACTOR	l_R	Longitud	0.3483	m
	a_R	Ancho	0.3029	m
	H_R	Altura Total	0.6361	m
	b_R	Espacio bajo el borde inferior de los electrodos	0.015	m
ELECTRODOS	a_{eR}	Ancho	0.3029	m
	h_e	Altura	0.6211	m
	esp_e	Espesor	3	mm
	N_e	Numero de electrodos	26	-
	A_{eR}	Área de electrodos	4.89	m ²
	-	Distribución espacial	1	cm
CONDICIONES DE OPERACIÓN	t_s	tiempo de electrocoagulación	15	min
	Q	caudal	165.6	L/h
	D_{corr}	densidad de corriente	18.63	A/m ²
	I_R	intensidad de corriente	91.12	A
	V_R	voltaje	46.27	V
	P_R	potencia	4.21	kW

Realizado por: Ernesto Tenelema,2018

Tabla 8-3: Resumen del tanque de sedimentación

DESCRIPCIÓN	Simbología		Valor	Unidad
SISTEMA DE SEDIMENTACIÓN	V_C	Volumen del cono	0.441	m ³
	θ_C	Angulo del cono	45	°
	V_{TC}	Volumen del tanque cilíndrico	5.301	m ³
	V_S	Volumen total del sedimentador	5.742	m ³
	R_C	Reparto central	0.75	m
	Tr_{TS}	Tiempo de retención teórica	3.01	h
	H_R	Altura de reparto	1	m
	C_V	Carga sobre vertedero de salida	0.30	m ³ /m.d

Realizado por: Ernesto Tenelema,2018

Tabla 9-3: Resumen del tanque de almacenamiento

DESCRIPCIÓN	Simbología		Valor	Unidad
TANQUE DE ALMACENAMIENTO	D_{TA}	Diámetro del tanque de almacenamiento	1.30	m
	R_{TA}	Radio del tanque de almacenamiento	0.65	m
	V_{TA}	Volumen del tanque de almacenamiento	4.00	m ³
	H_{TA}	Altura del tanque del tanque de almacenamiento	3 m	m

Realizado por: Ernesto Tenelema,2018

3.3 Proceso de producción

Diagrama propuesto de la planta de tratamiento de aguas residuales

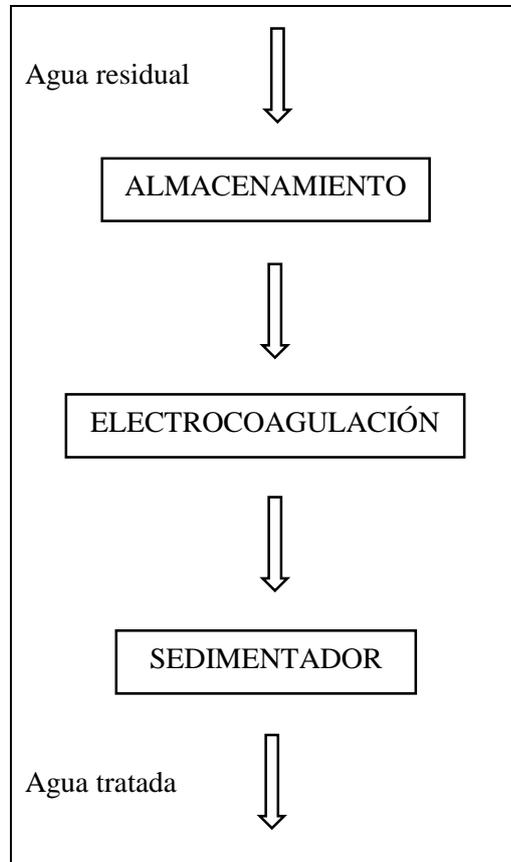


Figura 3-3: Diagrama de bloques para el tratamiento de aguas residuales

Realizado por: Tenelema, Ernesto;2018.

3.4 Requerimientos de tecnología, equipos y maquinaria.

3.4.1 *Requerimiento de Equipos*

Tabla 10-3: Materiales y equipos de muestreo

Materiales	Equipos
<ul style="list-style-type: none">• Zapatos de seguridad, casco y lentes• Pantalón jeans industrial• Mascarilla y mandil blanco• Guantes de nitrilo• Balde 10 L	<ul style="list-style-type: none">• Cámara fotográfica

Realizado por: Ernesto Tenelema,2018

Tabla 19-3: Materiales, equipos y reactivos utilizados en pruebas de tratamiento

Materiales	Equipos	Reactivos
Celda de electrocoagulación <ul style="list-style-type: none"> • Cables de cobre color rojo y negro • Electroodos de aluminio y hierro • Terminales de cobre • Cocodrilos • Grifo • Celda de metacrilato de metilo • Pegamento Varilla de agitación	<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de alimentación CD • Cronometro 	<ul style="list-style-type: none"> • Hidróxido de sodio • Cloruro de sodio

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018 Análisis de costo/beneficio del proyecto.

3.4.2 Cantidad de metal disuelto, (W , g/m^3)

Según Guanoluiza (2013), menciona que para calcular el consumo de los electrodos metálicos (ánodos) de aluminio, con los que se construirá el reactor de electrocoagulación se aplica la ecuación 26-3, que representa la ley de Faraday.

$$W = \frac{I \times t \times M_{Al}}{V_W \times Z \times F} \quad \text{Ecuación: 26-3}$$

Donde:

- I : corriente eléctrica (A)
- t : tiempo de electrocoagulación (s)
- M_{Al} : peso molecular del ánodo (g/mol)
- Z : número de electrodos trasferidos en la reacción redox
- F : constante de Faraday (96500 C/mol)
- V_W : volumen de agua a tratar (m^3)

$$W = \frac{3 \text{ A} \times 900 \text{ s} \times 26.98 \text{ g/mol}}{1.94 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \times 3 \times 96500 \text{ C/mol}}$$

$$W = 129.70 \text{ g/m}^3$$

Para determinar el costo que significaría reponer estos electrodos durante el tratamiento 1 m³ de agua residual por electrocoagulación, se consultó el precio estimado de aluminio en el mercado local que es de 4.36 USD/Kg.

$$\text{Costo de electrodos} = 0.1297 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 4.36 \frac{\text{USD}}{\text{Kg}}$$

$$\text{Costo de electrodos} = 0.57 \frac{\text{USD}}{\text{m}^3}$$

3.4.3 Cálculo del consumo de energía eléctrica del reactor de electrocoagulación (kWh /m³)

El consumo de energía eléctrica se determina con la ecuación 27-3 (Guanoluiza , 2013, p. 146), la misma que relaciona la potencia aplicada por tiempo de electrolisis sobre el volumen de agua a tratar.

$$\text{Consumo de energía} = \frac{V \times I \times t}{V_w \times 1000} \quad \text{Ecuación: 27-3}$$

Donde:

V: voltaje experimental (V)

I: corriente eléctrica (A)

t: tiempo de electrocoagulación (h)

V_w: volumen de agua a tratar (m³)

$$\text{Consumo de energía} = \frac{3.7 \text{ V} \times 3 \text{ A} \times 0.25 \text{ h}}{1.94 \times 10^{-3} \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ KW}}{1000 \text{ W}}$$

$$\text{Consumo de energía} = 1.43 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$$

El costo de energía eléctrica establecida por la Empresa Eléctrica Riobamba S.A (EERSA) es de 0.06 USD/kWh para las industrias, con este dato se calcula el consumo de energía eléctrica para tratar 1 m³ de efluente.

$$C_{\text{energía eléctrica}} = 1.43 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \times 0.06 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}}$$

$$C_{\text{energía eléctrica}} = 0.08 \frac{\text{USD}}{\text{m}^3}$$

Al sumar el costo de electrodos y energía eléctrica consumida en el tratamiento de un metro cubico de agua se tiene un valor de 0.65 USD. En el tratamiento de 4 m³ se gastaría entonces 2.60 USD diariamente.

3.4.4 *Vida útil de los electrodos*

Al igual que los electrodos de prueba, los electrodos dimensionados tendrán un espesor de 3 mm. Por tal motivo se relaciona entre área total de los electrodos con el peso total.

Área de los electrodos de prueba \Rightarrow 1398.11 *gramos*

Área de los electrodos dimensionados \Rightarrow *X gramos*

$$X \text{ gramos} = \frac{\text{Área de los electrodos dimensionados} \times 1398.11 \text{ gramos}}{\text{Área de los electrodos de prueba}}$$

$$X \text{ gramos} = \frac{4.89 \text{ m}^2 \times 1398.11 \text{ gramos}}{0.161 \text{ m}^2}$$

$$X \text{ gramos} = 42464.33 \text{ gr}$$

Según los cálculos realizados anteriormente el peso total de las 26 placas metálicas será de 42464.33 gramos. Tomando en consideración un desgaste del 80%, se tiene un peso real de 33971.46 gramos. Mediante los cálculos se determinó que diariamente se consume 518.8 gramos de metal, de esta manera se calcula el tiempo de reposición de los electrodos.

518.8 *gramos de metal consumido* \Rightarrow 1 *dia*

33971.46 *de metal consumido* \Rightarrow *X dia*

$$X \text{ dia} = \frac{33971.46 \text{ gramos de metal consumido} \times 1 \text{ dia}}{518.8 \text{ gramos de metal consumido}}$$

$$X \text{ dia} = 65 \text{ dias}$$

En el electrocoagulador las placas metálicas se cambiarán cada 65 días.

3.4.5 Presupuesto.

La empresa proveedora de instrumentos de prueba y medición (FINAL TEST), cotiza una fuente reguladora de corriente continua con la potencia obtenida, a un costo de 6.100 USD. Los materiales necesarios para la construcción de la planta de tratamiento se presentan en la Tabla 20-3.

Tabla 11-3: Costo de la planta de tratamiento

Equipos	Material	Costo individual	Cantidad necesaria	Costo total
TANQUE DE ALMACENAMIENTO	Acero AISI 304	700 USD	1	700 USD
	Construcción	200 USD	1	200 USD
SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN	Fuente de alimentación CD	6.100 USD	1	6.100 USD
	Celda en metacrilato de metilo	20 USD	4 m ²	80 USD
	Cables de cobre de color rojo 10 AWG	0.35 USD	10 m	3.50 USD
	Cables de cobre de color negro 10 AWG	0.35 USD	10 m	3.50 USD
	Cocodrilos	0.50 USD	26	13 USD
	Terminales de cobre	50 USD	2	100 USD
	Electrodos de aluminio	24.10 USD	4.89 m ²	117.8 USD
SEDIMENTADOR	Acero AISI 304	700 USD	1	700 USD
	Construcción	200 USD	1	200 USD
	Recubrimiento anticorrosivo	100 USD	1	100 USD
COSTO DEL TRATAMIENTO	Consumo de electrodos	0.57 USD	1 m ³	0.57 USD
	Consumo de energía eléctrica	0.08 USD	1 m ³	0.08 USD
Total				8318.45 USD

Realizado por: Ernesto Tenelema, 2018

3.5 Cronograma de ejecución del proyecto.

ACTIVIDADES	TIEMPO/MESES																											
	1 ^o				2 ^o				3 ^o				4 ^o				5 ^o				6 ^o							
	SEMANAS																											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
Revisión bibliográfica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Caracterización fisicoquímica del agua residual	■	■																										
Realizar pruebas de tratabilidad empleando un electrocoagulador a escala de laboratorio			■	■	■	■	■	■																				
Realizar cálculos de ingeniería para el dimensionamiento del equipo.					■	■	■	■	■	■	■	■																
validar el diseño del electrocoagulador													■	■	■	■	■	■	■	■								
Redacción del trabajo final	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Empastado y presentación del trabajo final																					■	■						
Auditoría Académica																					■	■	■	■				
Defensa del trabajo																												■

Realizado por: TENELEMA, Ernesto, 2018

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo a la caracterización físico-química del agua residual proveniente de la industria FAMILAC, se determinó que el agua residual proveniente del lavado de tanques de procesamiento necesita un tratamiento, dado que parámetros como: Aceites y grasas (216 mg/l), DBO5 (2515mg/l), DQO (mg/l), SST (mg/l), ST (mg/l) y S (mg/l), se encuentran fuera del Límite máximo permisible del TULSMA: Tabla 10-3. Descarga al sistema de alcantarillado público.

Los parámetros fuera L.M.P fueron el punto de partida en la presente investigación, posteriormente se realizaron 12 pruebas de tratabilidad (T1-T12) modificando las variables en estudio como: tiempo de electrólisis, intensidad de corriente y distribución de electrodos, como se muestra en la Tabla 7-3. Para seleccionar las pruebas de tratabilidad que serán enviadas a caracterización final, se tomó en cuenta el tiempo de sedimentación y flotación (< 1 hora), es decir se eligió los tratamientos con menor tiempo de sedimentación en este caso los tratamientos T1, T2, T8 y T11. Posterior a esto se midió el pH y la turbidez como variable de respuesta, como se especifica en la Tabla 12-3.

Después de caracterizar y analizar cada uno de los tratamientos seleccionados (T1, T2, T8 y T11), se optó por elegir el tratamiento número dos (T2), debido a que es el único tratamiento que cumple con la normativa. Seguidamente, se analizó aún más el tratamiento número dos (T2), con la finalidad de reducir los costos de tratabilidad, para ello se mantuvo constante la distribución de electrodos, intensidad de corriente y se varió el tiempo de tratamiento como se especifica en la Tabla 14-3. Se estudió parámetros como la turbidez, conductividad y TDS observando que disminuyen considerablemente al incrementar el tiempo de electrolisis (inversamente proporcional), obteniendo una máxima remoción de contaminantes hasta un tiempo de 25 minutos, pasado este tiempo la solución tiende a saturarse, por el contrario, el pH y la temperatura aumentan al incrementar el tiempo de electrolisis (directamente proporcional). Es importante mencionar que a 20 y 25 minutos de electrolisis existe una mayor remoción de contaminantes y al mismo tiempo mayor consumo de energía y electrodos. Por tal motivo se optó por conservar el tratamiento a 15 minutos puesto que a esas condiciones cumple con la normativa, y existe un ahorro en el consumo de electricidad y electrodos.

El T2 tiene un porcentaje de remoción de: 95.5 % Aceites y Grasas, 84.5 % DBO5, 83.0 % DQO, 98.7 % SST, 61.4 % ST y 92.2 % S y los valores óptimos de operación se obtuvieron con una intensidad de corriente $I = 3$ amperios, distribución de electrodos aluminio-aluminio y un tiempo de tratamiento de 15 minutos, estos valores fueron utilizados para el dimensionamiento del electrocoagulador a escala industrial.

En primera instancia se especulaba diseñar un electrocoagulador de 4 m^3 de capacidad que trabaje en régimen batch, con la finalidad de tratar el agua residual en un instante del día, pero esto interfiere en el costo de adquisición de la fuente de poder, debido a que necesita una elevada potencia para tratar dicha cantidad de agua residual. Por tal motivo el sistema batch fue descartado y se optó por diseñar un electrocoagulador continuo de menor tamaño, con esto evitamos elevados costos en la implementación del sistema de tratamiento. Para la implementación del sistema de tratamiento se necesita una inversión inicial 8318.45 USD, y la mayor inversión se encuentra en la fuente de alimentación que tiene un valor de 6.100 USD para la potencia calculada. Según Guanoluiza (2013) en su investigación sobre tratamiento de aguas por electrocoagulación cotiza una fuente de alimentación en 100.000 USD. Con este antecedente se determina que la fuente de poder tiene un costo significativo en la instalación de este tipo de tratamientos. Por otro lado, mediante cálculos matemáticos se determinó el consumo de energía eléctrica y electrodos con un costo total de 0.65 USD para tratar 1 m^3 de agua residual, concluyendo que el costo de tratamiento no es significativo comparado con la inversión inicial.

El sistema de tratamiento está diseñado para trabajar a un flujo continuo con un caudal de diseño de 0.046 l/s y está formado por tres etapas como son: almacenamiento, electrocoagulación y sedimentación. El agua residual se recolecta en un tanque de almacenamiento de 4 m^3 de capacidad, para posteriormente pasar al sistema de tratamiento. El reactor de electrocoagulación posee las siguientes dimensiones (longitud=0.35 m, ancho=0.30 m, altura=0.64 m) y esta conectada a una fuente de alimentación de corriente continua con una capacidad de 91.12 A y 46.27 V y posee las siguientes características: dirección de flujo vertical, tipo de conexión monopolar. Como última etapa de tratamiento se dimensiono un sedimentador de tipo cónico de 5.742 m^3 de capacidad con la finalidad de separar las partículas suspendidas (lodos) y el agua tratada.

CONCLUSIONES

- Se caracterizó fisicoquímicamente el agua residual de la industria láctea FAMILAC, en base a la normativa vigente del TULSMA, Tabla 8 Límites de Descarga al Sistema de Alcantarillado Público. Destacando los parámetros más representativos como: aceites y grasas, DQO5, DQO, N, pH, SD, SST, ST, S y Temperatura.
- A partir de la caracterización inicial se identificó los parámetros fuera L.M.P de la normativa como son: aceites y grasas (216 mg/l), DQO5 (2515 mg/l), DQO (4420 mg/l), SST (495 mg/l), ST (3892 mg/l) y S (6.4 mg/l) quienes se redujeron considerablemente luego de los tratamientos.
- En las pruebas por electrocoagulación se trabajó con electrodos de hierro y aluminio, y se determinó experimentalmente que la mejor combinación de variables para el cumplimiento a cabalidad de la normativa fue una distribución de electrodos aluminio-aluminio, intensidad de corriente de 3 amperios y un tiempo de tratamiento de 15 minutos.
- A partir de la celda de pruebas se dimensionamiento el electrocoagulador para tratar un caudal de 0.046 l/s, siendo de (0.35 x 0,30 x 0,64) m de longitud, ancho y altura, y para su funcionamiento requiere de una fuente de alimentación de corriente continua con una potencia de 4.21 KW. Además, como complemento a ello se dimensionó un tanque para captar agua residual de 4 m³ de capacidad y un sedimentador circular, el mismo que tiene capacidad para tratar 5.742 m³ de agua residual.
- Se validó el diseño con los parámetros que se encuentran fuera de la normativa mediante la caracterización final del agua, en donde se obtuvieron los siguientes porcentajes en remoción 95.5 % Aceites y Grasas, 84.5 % DBO5, 83.0 % DQO, 98.7 % SST, 61.4 % ST y 92.2 % S con estos resultados se logra cumplir con la normativa.

RECOMENDACIONES

- Realizar análisis microbiológicos tras aplicar el proceso de electrocoagulación en este tipo de aguas residuales.
- En las pruebas de tratabilidad se empleó electrodos de aluminio y hierro se sugiere experimentar con otros tipos de materiales como cobre, acero inoxidable etc.
- Realizar caracterizaciones fisicoquímicas a los lodos producidos durante el proceso de electrocoagulación que permita encontrar el tratamiento más adecuado para su disposición final.
- Intercambiar la polaridad de los electrodos, para que el desgaste sea igual en el ánodo como el cátodo.
- Tener cuidado con las conexiones eléctricas, debido a que pueden causar corto circuitos y daños irreparables a la fuente de alimentación.
- Limpiar la celda de electrocoagulación y el sedimentador después de cada tratamiento.
- Se recomienda implementar esta técnica para el tratamiento de aguas residuales, debido a que se obtiene elevados porcentajes de remoción de los contaminantes.
- El lodo producido, es recomendable utilizar en el tratamiento de aguas por lodos activados.
- Es recomendable cambiar las placas metálicas cada 65 días.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Aguilar Ascon, E. A.** Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala de laboratorio para el tratamiento de agua [En línea] (tesis).(Maestría) Universidad San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Peru.2015. [Consultado:2018-06-23].Disponible en: <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/4303>
2. **Alvear Peña, P. J. & Olivio Orozco, R. F.** Diseño y construcción de un sistema prototipo de electrocoagulación para tratamiento de aguas residuales de procesos de tinturado de empresas textiles [En línea] (tesis).(Maestría) Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Ecuador.2018. [Consultado:2018-06-23].Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec>
3. **Apaza Aquino, H.** Sistema combinado electrocoagulación-filtro biológico para la remoción de carga orgánica de los efluentes lácteos [En línea] (tesis).(Maestría) Universidad la Molina, Escuela de Posgrado, Peru.2018. [Consultado:2018-06-23].Disponible en:<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3395>
4. **Arboleda Camacho, J. M & Herrera López, P. J.** Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr 6+) con electrodos de aluminio – aluminio y de hierro –aluminio en condiciones de laboratorio [En línea] (tesis).(Pregrado) Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería ambiental, Colombia.2015. [Consultado:2018-06-23].Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/613>
5. **Barragán Fonseca, G. C.** Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales de las líneas del proceso en la planta de lácteos paraíso del cantón salcedo [En línea] (tesis).(Pregrado) Epoch, Facultad de ciencias, Ecuador .2015. [Consultado:2018-06-23].Disponible en: <http://dspace.epoch.edu.ec/bitstream/123456789/3118/1/236T0084.pdf>
6. **Barrera Díaz, C. E** Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de agua residuales [En línea] Universidad Autónoma del Estado de México, Mexico.2014. [Consultado:2018-06-23]. Disponible en: http://www.siea.uaemex.mx/siestudiosa/FrmEditorial/2014/L_513_6.pdf
7. **Cambo Chillo, N. A.** Diseño de un electrocoagulador para eltratmiento de aguas industriales clarificadas de la empresa plusambiente base cantón joya de los sachas, provincia de orellana (tesis).(Pregrado) ESPOCH, Facultad de ciencias, Ecuador. 2017.pp 5-47.
8. **Cohn, C & Beger, P.** Aspectos de la calidad del agua. Segunda Edición. New Jersey– Estados unidos: Editorial PublishersGlobal, 2010, pp.453-478.
9. **Crites, R.** Tratamiento Preliminar de Aguas Residuales: Operaciones y Procesos. Bogotá-Colombia: McGraw-Hill, 2000, pp. 242-280
10. **Daros, G.** La contaminación de aguas en Ecuador. Segunda edición. Quito-Ecuador: Editorial Lavigne, 2005, p.5.
11. **Delgadillo, O. et al.** Depuración de aguas residuales. Tercera edición. Cochabamba-Bolivia: Editorial Antequera,2010, p.57.

12. **Elías, X.** Reciclaje de residuos industriales. Segunda edición. Madrid –España: Editorial Díaz de Santos, 2012, p.596.
13. **Ferniza García, F. 2017.** Eficiencia de un sistema acoplado electrocoagulación-fitorremediación para la remoción de Pb, Cu, Cd y Zn, presentes en efluentes mineros [En línea] (tesis).(Maestría) Universidad Autónoma del Estado de México, México.2017. [Consultado:2018-06-23].Disponible en: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/65059>
14. **Guanoluiza Llive, L. E.** Dimensionamiento de un sistema de electrocoagulación aplicado al tratamiento de aguas residuales domésticas, con y sin irradiación de electrones acelerados [En línea] (tesis).(Pregrado) Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Ecuador .2013. [Consultado:2018-06-23].Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7062>
15. **Hernández Rodriguez, D.** Tratamiento acoplado fisicoquímico electrocoagulación para incrementar la remoción de la materia orgánica de un agua residual de rastro municipal [En línea] (tesis).(Maestría) Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería, MÉXICO.2016.[Consultado:2018-06-23].Disponible en: <http://www.remeri.org.mx/portal/REMERI.jsp?id=oai:ri.uaemex.mx:20.500.11799/65337>
16. **Linares Hernadez, I & et al.** Oxidación de materia orgánica persistente en aguas residuales industriales mediante tratamientos electroquimicos [En línea] 2010.pp.21-31.Vol.2. [Consultado:2018-06-23].Disponible en: <http://www.remeri.org.mx/portal/REMERI.jsp?id=oai:ri.uaemex.mx:20.500.11799/40272>
17. **Maldonado Yactayo, V.**Sedimentación.2010.[En línea].[Consultado:2018-06-23].Disponible en: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/siete.pdf>
18. **Martínez Navaro, F. 2007.** Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional [En línea] (tesis).(Maestría)Universidad de Castilla-La Mancha,Facultad de Ciencias Químicas,Ciudad Real.2007.p.27 [Consultado:2018-06-23] Disponible en: <https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/984/251%20Tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20industriales.pdf>
19. **Medina Cevallos, J. F & Peralta Calderon, M. O.**Validación de un prototipo de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica presentes en la industria. [En línea] (tesis).(Pregrado) Univerdiad Politecnica Salesiana Sede Cuenca,Carrera de Ingeniería Ambiental,Cuenca.2015. [Consultado:2018-06-23] Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10702/1/UPS-CT005499.pdf>
20. **Mendieta Cabrera, M. A.**Dimensionamiento de un proceso de electroagulación para el tratamiento de aguas lixiviadas del relleno sanitario “El INCA” [En línea] (tesis).(Pregrado)Escuela Politecnica Nacional,Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria,Quito.2013. [Consultado:2018-06-23] Disponible en: <https://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen34/tomo1/DisenodeSistemasdeTratamientodeLixiviadosdelRellenoSanitario.pdf>

21. **Metcalf, J; & Eddy, P.** Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización. Tercera edición. Madrid-España: Editorial McGraw – Hill Interamericana, 1995, pp. 538-551.
22. **Molero, M; & Contreras, F.** Ciencia y tecnología del medio ambiente. Segunda edición. Madrid-España: Editorial Díaz de Santos, 2011, pp.165-208.
23. **Monsalve Osorio, J. A & Cardona Gómez, S.** Electrocoagulación para reúso de aguas residuales del proceso de impresión en la industria papelera [En línea] (tesis).(Pregrado) Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Química, Medellín. 2014. [Consultado:2018-06-23] Disponible en: <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/2286/ELECTROCOAGULACION%20PARA%20REMOCION%20DE%20COLOR%20Y%20OQO.pdf?sequence=1>
24. **Piña-Soberanis, M, et al.** Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. México : Revista Mexicana de Ingeniería Química [En línea] 2011. pp.257-271. Vol.10. [Consultado:2018-06-23]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382011000200010
25. **Ramallo, R.** Tratamiento de aguas residuales. Madrid –España: Editorial Reverte S.A, 2003, p.93.
26. **Ramos Guambo, K.** Diseño de un sistema de tratamiento del agua residual de la fabrica de textiles Hilario en el Cantón Guano (tesis).(Pregrado) ESPOCH, Facultad de ciencias, Ecuador. 2017. pp 5-6
27. **Riccio Yauri, L. F.** Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas del colector agua de las virgenes por electrocoagulación, a nivel de laboratorio, Utilizando como fuente energética un panel fotovoltaico [En línea] (tesis).(Posgrado) Universidad Nacional del Perú, Unidad de posgrado. Perú .2015. [Consultado:2018-06-23]. Disponible en: <http://www.lareferencia.info>
28. **Rigola, M.** Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y aguas residuales. Barcelona-España: Editorial Marcombo, 1999, pp.38-39.
29. **Sánchez, O.** Perspectivas sobre conservación de medios acuáticos. México-México: Editorial Marquéz, 2007, pp.124-125.
30. **Terence, J.** Abastecimiento de Agua y Alcantarillado. Bogotá – Colombia: Editorial McGraw – Hill Interamericana, 2000, p. 424.
31. **TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACIÓN SECUNDARIA DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE (TULSMA).**, Quito-Ecuador, 2015, MAE, Libro VI, Anexo I, Tabla 8.
32. **Yaguana Gallegos, N. V & Almeida Carrera, J. C.** Diseño y construcción de un reactor prototipo a nivel de laboratorio utilizado para el tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación [En línea] (tesis).(Pregrado) ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecatrónica. Sangolquí. 2015. [Consultado:2018-06-23]. Disponible en: repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/11424

ANEXOS

Anexo A: Determinación de caudal y muestreo

a.



b.



c.



NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA	DISEÑO DE UN ELECTROCOAGULADOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA FAMILAC DEL CANTÓN CHAMBO		
a. Determinación de lcaudal b. Muestreo de aguas residuales c. Área de procesos FAMILAC	<input type="checkbox"/> Certificado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Por calificar <input type="checkbox"/> Por verificar		Ernesto Tenelema	ESCALA	FECHA
			1:1	2018-12-20	1

Anexo B: Implementos para el sistema de electrocoagulación

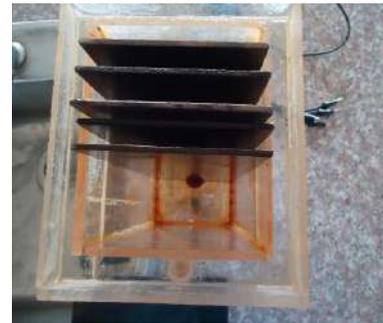
d.



e.



f.



g.



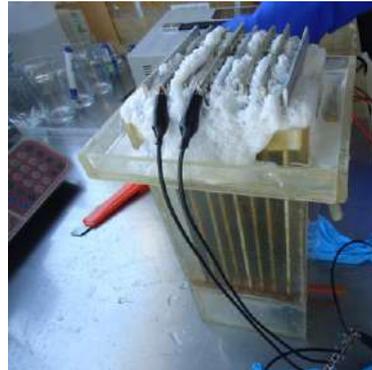
NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA Ernesto Tenelema	DISEÑO DE UN ELECTROCOAGULADOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA FAMILAC DEL CANTÓN CHAMBO		
d. Electrodo de hierro y aluminio e. Cables y lagartos de conexión f. Celda de pruebas g. Fuente de corriente CD	<input type="checkbox"/> Certificado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Por calificar <input type="checkbox"/> Por verificar		ESCALA 1:1	FECHA 2018-12-20	LÁMINA 2

Anexo C: Tratamientos con electrodos de hierro y aluminio

h.



i.



j.



k.



NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	<p style="text-align: center;">ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA</p> <p style="text-align: center;">Ernesto Tenelema</p>	DISEÑO DE UN ELECTROCOAGULADOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA FAMILAC DEL CANTÓN CHAMBO		
<p>h. Sistema de electrocoagulación</p> <p>i. Tratamiento con electrodos de Al-Al</p> <p>j. Tratamiento con electrodos de Fe-Fe</p> <p>k. Tratamiento con electrodos de Fe-Al</p>	<p><input type="checkbox"/> Certificado</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Aprobado</p> <p><input type="checkbox"/> Por aprobar</p> <p><input type="checkbox"/> Por calificar</p> <p><input type="checkbox"/> Por verificar</p>		ESCALA	FECHA	LÁMINA
			1:1	2018-12-20	3

Anexo D: Tratamientos 1,2,9,11 para caracterización

l.



m.



NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	<p align="center"> ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA Ernesto Tenelema </p>	<p align="center"> DISEÑO DE UN ELECTROCOAGULADOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA FAMILAC DEL CANTÓN CHAMBO </p>		
<p>l. Agua residual (izquierda), Tratamientos T1-T2-T8-T11 (derecha)</p> <p>m. Agua residual(izquierda), Tratamientos para caracterización (Derecha).</p>	<p><input type="checkbox"/> Certificado</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Aprobado</p> <p><input type="checkbox"/> Por aprobar</p> <p><input type="checkbox"/> Por calificar</p> <p><input type="checkbox"/> Por verificar</p>		ESCALA	FECHA	LÁMINA
			1:1	2018-12-20	4

Anexo E: Tratamientos a 5,10,15,20,25 y 30 minutos con electrodos (Al-Al) y 3 Amperios

n.



o.



NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA Ernesto Tenelema	DISEÑO DE UN ELECTROCOAGULADOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LACTEA FAMILAC DEL CANTON CHAMBO		
n. Agua residual (izquierda), Tratamientos a 5,10,15,20,25,30 min (derecha) o. Lodos producidos con electrodos de aluminio.	<input type="checkbox"/> Certificado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Por calificar <input type="checkbox"/> Por verificar		ESCALA	FECHA	LÁMINA
			1:1	2018-12-20	5

Anexo F: Tabla 8: Descarga al alcantarillado público del TULSMA

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y grasas	Sust. solubles en hexano	mg/l	70,0
Explosivos o inflamables	Sustancias	mg/l	Cero
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,1
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	CN ⁻	mg/l	1,0
Cinc	Zn	mg/l	10,0
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo	mg/l	0,1
Cobalto total	Co	mg/l	0,5
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Compuestos fenólicos	Expresado como fenol	mg/l	0,2
Compuestos organoclorados	Organoclorados totales	mg/l	0,05
Cromo Hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO ₅	mg/l	250,0
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	500,0
Dicloroetileno	Dicloroetileno	mg/l	1,0
Fósforo Total	P	mg/l	15,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	20,0
Hierro total	Fe	mg/l	25,0
Manganeso total	Mn	mg/l	10,0
Mercurio (total)	Hg	mg/l	0,01
Níquel	Ni	mg/l	2,0
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/l	60,0
Organofosforados	Especies Totales	mg/l	0,1
Plata	Ag	mg/l	0,5
Plomo	Pb	mg/l	0,5
Potencial de hidrógeno	pH		6-9
Selenio	Se	mg/l	0,5
Sólidos Sedimentables	SD	ml/l	20,0
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	220,0
Sólidos totales	ST	mg/l	1 600,0
Sulfatos	SO ₄ ^{- 2}	mg/l	400,0
Sulfuros	S	mg/l	1,0
Temperatura	°C		< 40,0
Tensoactivos	Sustancias Activas al azul de metileno	mg/l	2,0
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	mg/l	1,0
Tricloroetileno	Tricloroetileno	mg/l	1,0

Anexo G: Caracterización inicial del agua residual (C1)



Contáctanos: 0998580374 - 032924322
Av. 11 de Noviembre y Milton Reyes Riobamba – Ecuador

INFORME DE ANÁLISIS DE AGUAS

Fecha: 17 de agosto del 2018

Análisis solicitado por: Sr. Ernesto Tenelema. Industria Láctea FAMILAC

Tipo de muestras: Agua residual industrial, del lavado de tanques.

Localidad: Parroquia Tunshi San Pedro Cantón Chambo

Análisis Químico

Código 052-18

Determinaciones	Unidades	*Métodos de análisis	**Valores referenciales	Resultados
Temperatura	°C	2550-B	< 40	30
pH	-	4500-H ⁺ -B	5-9	6.34
Turbiedad	UNT	2130-B		301.0
Aceites y Grasas	mg/L	5520-B	70	332.0
Nitrógeno Orgánico Total	mg/L	4500-N _{ORG} -C	60	47.0
Sulfuros	mg/L	4500-S ⁻ E	1.0	12.8
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5220-C	500	2 520.0
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	5210-B	250	2 370.0
Sólidos Suspendidos	mg/L	2540-B	220	318
Sólidos Sedimentables	mL/L	2540-B	20	1.9
Sólidos Totales	mg/L	2540-	1 600	2 580.0

*Métodos Normalizados. APHA, AWWA, WPCF.

** Libro VI Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: calidad ambiental y descarga de efluentes al recurso agua. Tabla 8 descarga al alcantarillado público

Observaciones:

Atentamente,

Dra. Gina Álvarez R.

RESP. LAB. ANÁLISIS TÉCNICOS

Nota: El presente informe afecta solo a la muestra analizada.



Anexo H: Caracterización del tratamiento número 1(T1)



Contáctanos: 0998580374 - 032924322
Av. 11 de Noviembre y Milton Reyes Riobamba – Ecuador

INFORME DE ANÁLISIS DE AGUAS

Fecha: 21 de agosto del 2018

Análisis solicitado por: Sr. Ernesto Tenelema. Industria Láctea FAMILAC

Tipo de muestras: Agua residual industrial tratada.

Localidad: Parroquia Tunshi San Pedro Cantón Chambo

Análisis Químico

Código 053-01-18

Tratamiento 1

Determinaciones	Unidades	*Métodos de análisis	**Valores referenciales	Resultados
Temperatura	°C	2550-B	< 40	30
pH	-	4500-H ⁺ -B	5-9	7.64
Turbiedad	UNT	2130-B		11.0
Aceites y Grasas	mg/L	5520-B	70	12.6
Nitrógeno Orgánico Total	mg/L	4500-N _{ORG} -C	60	0.7
Sulfuros	mg/L	4500-S E	1.0	0.8
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5220-C	500	408.0
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	5210-B	250	335.0
Sólidos Suspendedos	mg/L	2540-B	220	19
Sólidos Sedimentables	mL/L	2540-B	20	<0.1
Sólidos Totales	mg/L	2540-	1 600	1 196.0

*Métodos Normalizados. APHA, AWWA, WPCF.

** Libro VI Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: calidad ambiental y descarga de efluentes al recurso agua. Tabla 8 descarga al alcantarillado público

Observaciones:

Atentamente,



Dra. Gina Álvarez R.

RESP. LAB. ANÁLISIS TÉCNICOS

Nota: El presente informe afecta solo a la muestra analizada.

Anexo I: Caracterización del tratamiento número 2 (T2)



Contáctanos: 0998580374 - 032924322
Av. 11 de Noviembre y Milton Reyes Riobamba – Ecuador

INFORME DE ANÁLISIS DE AGUAS

Fecha: 21 de agosto del 2018

Análisis solicitado por: Sr. Ernesto Tenelema. Industria Láctea FAMILAC

Tipo de muestras: Agua residual industrial tratada.

Localidad: Parroquia Tunshi San Pedro Cantón Chambo

Análisis Químico

Código 053-02-18

Tratamiento 2

Determinaciones	Unidades	*Métodos de análisis	**Valores referenciales	Resultados
Temperatura	°C	2550-B	< 40	30
pH	-	4500-H ⁺ -B	5-9	8.48
Turbiedad	UNT	2130-B		4.9
Aceites y Grasas	mg/L	5520-B	70	15.0
Nitrógeno Orgánico Total	mg/L	4500-N _{ORG} -C	60	4.1
Sulfuros	mg/L	4500-S ⁻ E	1.0	1.0
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5220-C	500	428.0
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	5210-B	250	167.0
Sólidos Suspendedos	mg/L	2540-B	220	4.0
Sólidos Sedimentables	mL/L	2540-B	20	<0.1
Sólidos Totales	mg/L	2540-	1 600	996.0

*Métodos Normalizados. APHA, AWWA, WPCF.

** Libro VI Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: calidad ambiental y descarga de efluentes al recurso agua. Tabla 8 descarga al alcantarillado público

Observaciones:

Atentamente,

Dra. Gina Álvarez R.

RESP. LAB. ANÁLISIS TÉCNICOS

Nota: El presente informe afecta solo a la muestra analizada.



Anexo J: Caracterización del tratamiento número 8 (T8)



Contáctanos: 0998580374 - 032924322
Av. 11 de Noviembre y Milton Reyes Riobamba – Ecuador

INFORME DE ANÁLISIS DE AGUAS

Fecha: 21 de agosto del 2018

Análisis solicitado por: Sr. Ernesto Tenelema. Industria Láctea FAMILAC

Tipo de muestras: Agua residual industrial tratada.

Localidad: Parroquia Tunshi San Pedro Cantón Chambo

Análisis Químico

Código 053-03-18

Tratamiento 8

Determinaciones	Unidades	*Métodos de análisis	**Valores referenciales	Resultados
Temperatura	°C	2550-B	< 40	30
pH	-	4500-H ⁺ -B	5-9	7.89
Turbiedad	UNT	2130.B		5.3
Aceites y Grasas	mg/L	5520-B	70	13.0
Nitrógeno Orgánico Total	mg/L	4500-N _{ORG} -C	60	2.1
Sulfuros	mg/L	4500-S-E	1.0	1.8
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5220-C	500	367.0
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	5210-B	250	271.0
Sólidos Suspendedos	mg/L	2540-B	220	10
Sólidos Sedimentables	mL/L	2540-B	20	<0.1
Sólidos Totales	mg/L	2540-	1 600	1 168.0

*Métodos Normalizados: APHA, AWWA, WPCF

** Libro VI Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: calidad ambiental y descarga de efluentes al recurso agua. Tabla 8 descarga al alcantarillado público.

Observaciones:

Atentamente,

Dra. Gina Álvarez R.

RESP. LAB. ANÁLISIS TÉCNICOS

Nota: El presente informe afecta solo a la muestra analizada.



Anexo K: Caracterización del tratamiento número 11 (T11)



Contáctanos: 0998580374 - 032924322
Av. 11 de Noviembre y Milton Reyes Riobamba – Ecuador

INFORME DE ANÁLISIS DE AGUAS

Fecha: 21 de agosto del 2018

Análisis solicitado por: Sr. Ernesto Tenelema. Industria Láctea FAMILAC

Tipo de muestras: Agua residual industrial tratada.

Localidad: Parroquia Tunshi San Pedro Cantón Chambo

Análisis Químico

Código 053-04-18

Tratamiento 11

Determinaciones	Unidades	*Métodos de análisis	**Valores referenciales	Resultados
Temperatura	°C	2550-B	< 40	30
pH	-	4500-H ⁺ -B	5-9	7.32
Turbiedad	UNT	2130-B		6.7
Aceites y Grasas	mg/L	5520-B	70	11.8
Nitrógeno Orgánico Total	mg/L	4500-N _{ORG} -C	60	2.3
Sulfuros	mg/L	4500-S E	1.0	0.8
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5220-C	500	379.0
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	5210-B	250	343.0
Sólidos Suspendedos	mg/L	2540-B	220	18
Sólidos Sedimentables	mL/L	2540-B	20	<0.1
Sólidos Totales	mg/L	2540-	1 600	1 100.0

*Métodos Normalizados. APHA, AWWA, WPCF.

** Libro VI Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: calidad ambiental y descarga de efluentes al recurso agua. Tabla 8 descarga al alcantarillado público

Observaciones:

Atentamente.


Dra. Gina Álvarez R.

RESP. LAB. ANÁLISIS TÉCNICOS

Nota: El presente informe afecta solo a la muestra analizada.



Anexo L: Caracterización inicial del agua residual (C2)

ESPOCH

**LABORATORIO DE CALIDAD DEL AGUA
FACULTAD DE CIENCIAS**

Casilla 06-01-4703

Telefax: 2998 200 ext 332

Riobamba - Ecuador

INFORME DE ANÁLISIS DE AGUAS

Análisis solicitado por: Sr. Ernesto Tenelema. Industria Láctea FAMILAC

Fecha de Análisis: 19-11-2018

Tipo de muestras: Agua Residual industrial, del lavado de tanques

Localidad: Comunidad Tunshi San Pedro Cantón Chambo

TRABAJO DE TITULACION

Caracterización inicial 2 del agua residual

Determinaciones	Unidades	*Método	**Limites	Resultados
Temperatura	°C	2550-B	<40	30
pH	-	4500-H ⁺ -B	6-9	6.92
Turbiedad	UNT	2130-B	-	320
Aceites y Grasas	mg/l	5520-B	70	100
Nitrógeno Orgánico total	mg/l	4500-N _{ORG} -C	60	70
Sulfuros	mg/l	4500-S-E	1.0	0
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5220-C	500	6320
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	5210-B	250	2660
Sólidos Suspendidos	mg/l	2540-B	220	672
Sólidos Sedimentables	mL/L	2540-B	20	0.5
Sólidos Totales	mg/L	2540-B	1600	5200

*Métodos Normalizados. APHA, AWWA, WPCF 17 ed.

**TULSMA TABLA 8. Límites de descarga al alcantarillado público.

Anexo M: Métodos y Análisis físico del tratamiento 2 en función del tiempo

Métodos físico-químicos utilizados en la caracterización del agua residual

Determinaciones	Unidades	*Método
Temperatura	°C	2550-B
pH	-	4500-H ⁺ -B
Turbiedad	UNT	2130-B
Aceites y Grasas	mg/l	5520-B
Nitrógeno Orgánico total	mg/l	4500-NORG-C
Sulfuros	mg/l	4500-S-E
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5220-C
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	5210-B
Sólidos Suspendidos	mg/l	2540-B
Sólidos Sedimentables	mL/L	2540-B
Sólidos Totales	mg/L	2540-B
Turbiedad	NTU	2130-B
Conductividad	mS/cm	2510-B
TDS	mg/l	2540-C

Fuente, *Métodos Normalizados. APHA, AWWA, WPCF 17 ed

Análisis físico del tratamiento 2

Se analizó el tratamiento número 2 (T2) manteniendo constante la distribución de electrodos (Al-Al) e intensidad de corriente (3A) y variando el tiempo de electrolisis como se detalla en la tabla 2. En estas condiciones se analizó la variabilidad de parámetros como la turbidez, conductividad, TDS, pH y temperatura (°C).

Análisis físico del tratamiento 2 en función del tiempo

Tabla 1: Análisis físico del tratamiento 2 en función del tiempo

Tratamientos	Tiempo (min)	Turbidez (NTU)	Conductividad (µs/cm)	TDS (mg/l)	pH	T (°C)
AR	0	310.00	910	480	6.64	21.4
T2-1	5	180.00	850	450	6.69	22.4
T2-2	10	39.00	820	440	7.01	23.5
T2-3	15	15.15	690	370	7.19	25.8
T2-4	20	7.01	630	330	8.25	27.4
T2-5	25	6.61	550	290	8.94	28.3
T2-6	30	1490	1000	500	9.03	29.5

Elaborado por: Ernesto Tenelema, 2018

Laboratorio de Calidad del Agua de la Facultad de Ciencias ESPOCH

Anexo N: Cantidad de metal disuelto del tratamiento 2 (T2) en función del tiempo

Análisis de la cantidad de metal disuelto del tratamiento 2 en función del tiempo

Tabla 2: Cantidad de metal disuelto del tratamiento 2 en función del tiempo

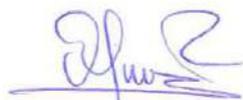
Tratamientos	Tiempo (min)	Peso total de placas (g)		(g) de metal disuelto	% de metal disuelto
		Peso inicial (g)	Peso final (g)		
T2-1	5	1398,11	1396,60	1,51	0,11
T2-2	10	1396,60	1394,35	2,25	0,16
T2-3	15	1394,35	1391,29	3,06	0,22
T2-4	20	1391,29	1387,51	3,78	0,27
T2-5	25	1387,51	1382,96	4,55	0,33
T2-6	30	1382,96	1377,65	5,31	0,38

Elaborado por: Ernesto Tenelema, 2018

Laboratorio de Calidad del Agua de la Facultad de Ciencias ESPOCH

Observaciones:

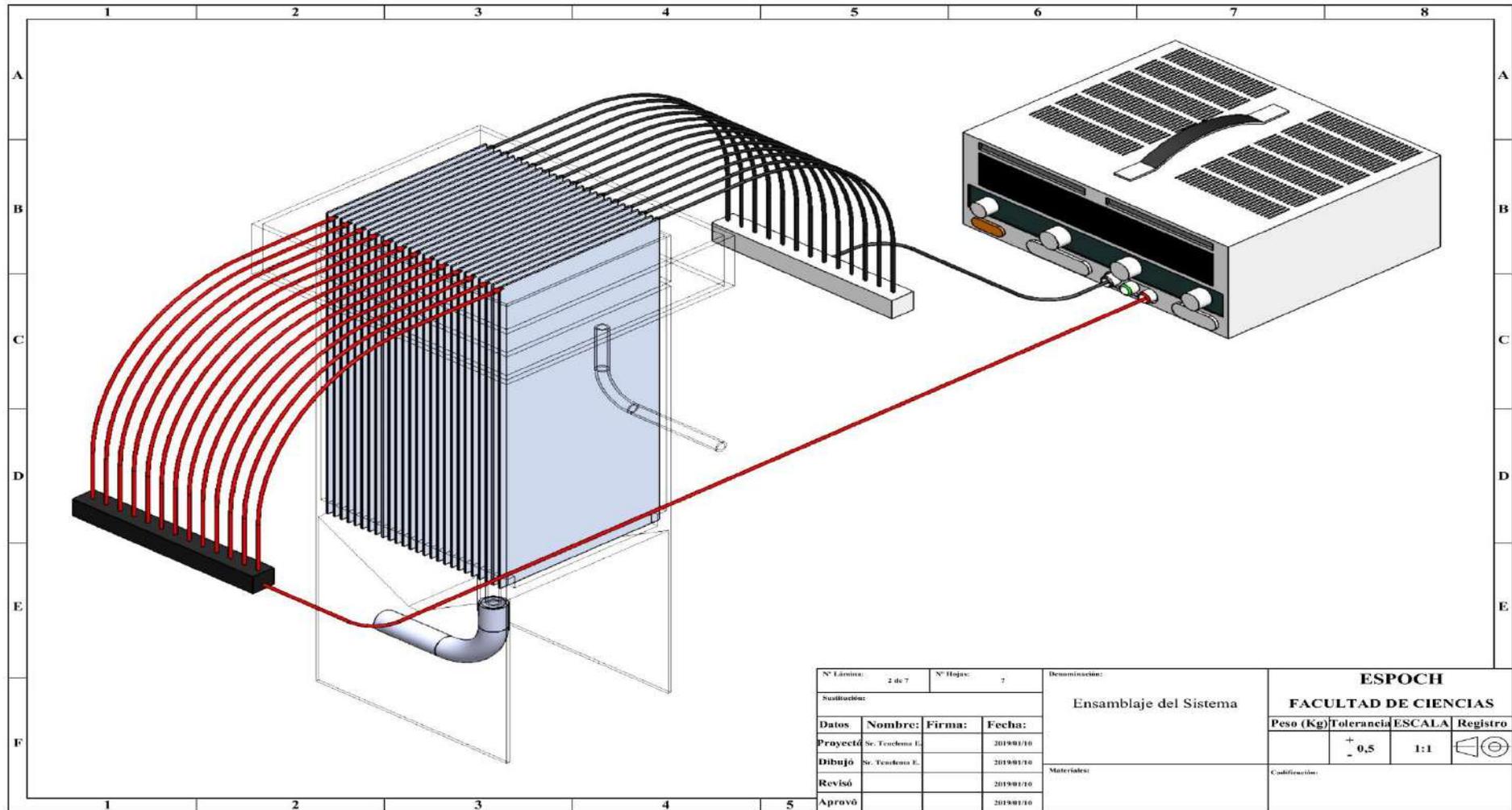
Atentamente.



Dra. Gina Álvarez R.
RESP. LAB. CALIDAD DEL AGUA

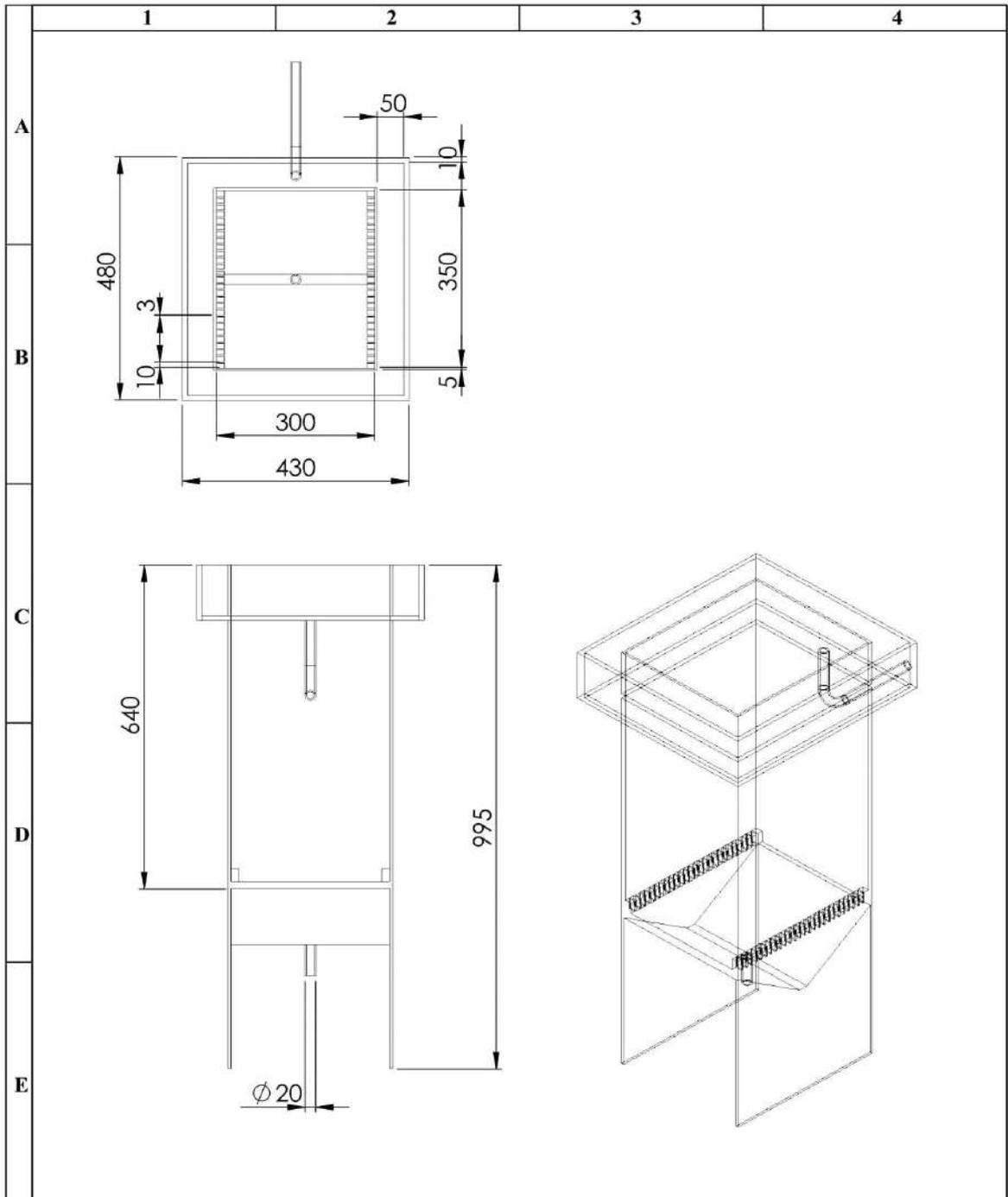


Anexo O: Sistema de electrocoagulación



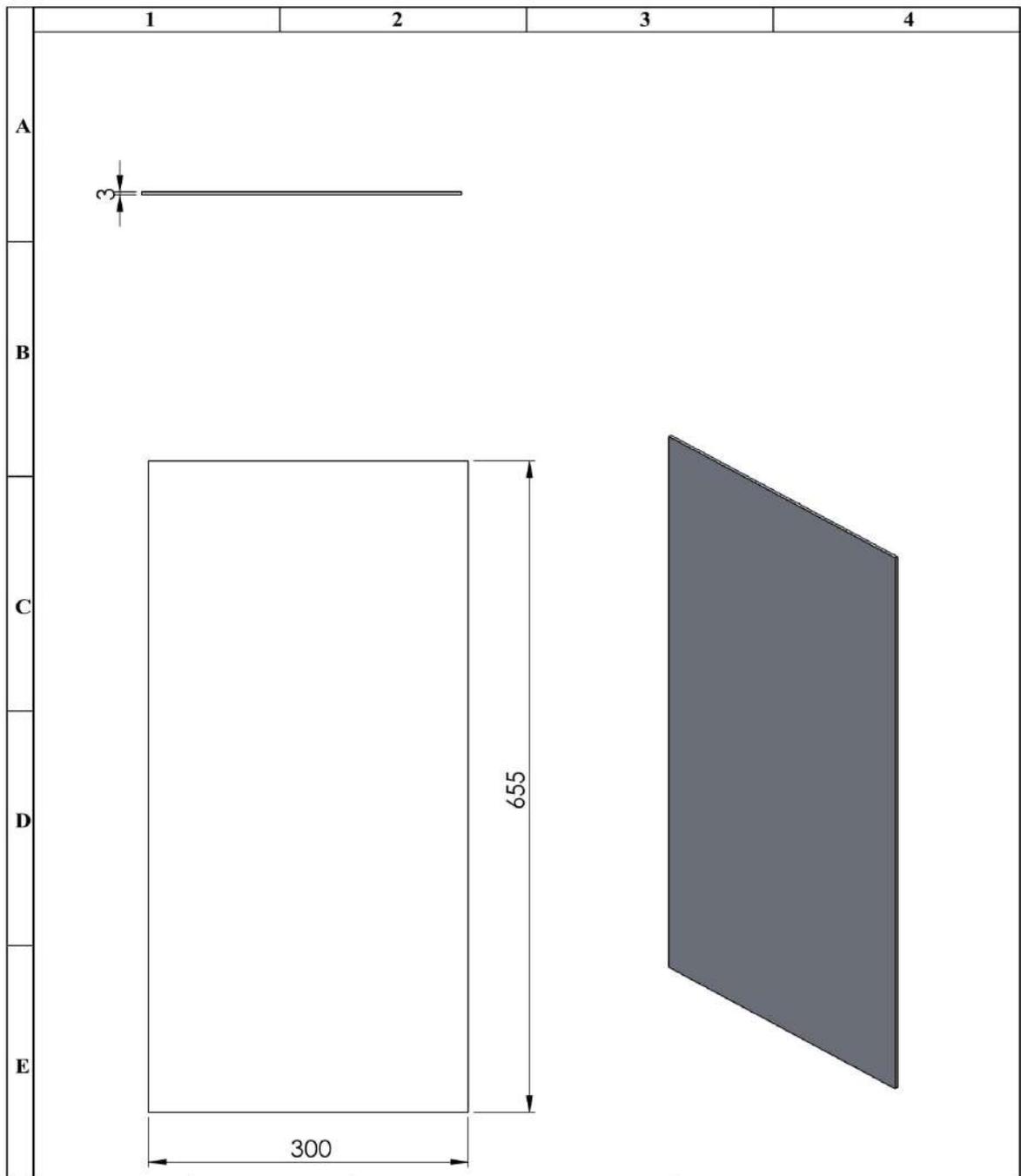
N° Láminas: 2 de 7		N° Hojas: 7		Denominación:		ESPOCH			
Sustitución:				Ensamblaje del Sistema		FACULTAD DE CIENCIAS			
Datos	Nombre:	Firma:	Fecha:			Peso (Kg)	Tolerancia	ESCALA	Registro
Proyectó	Sr. Teodoro E.		2019/01/10		$\pm 0,5$	1:1			
Dibujó	Sr. Teodoro E.		2019/01/10	Materiales:		Calificación:			
Revisó			2019/01/10						
Aprovó			2019/01/10						

Anexo P: Dimensiones de la celda electrolítica



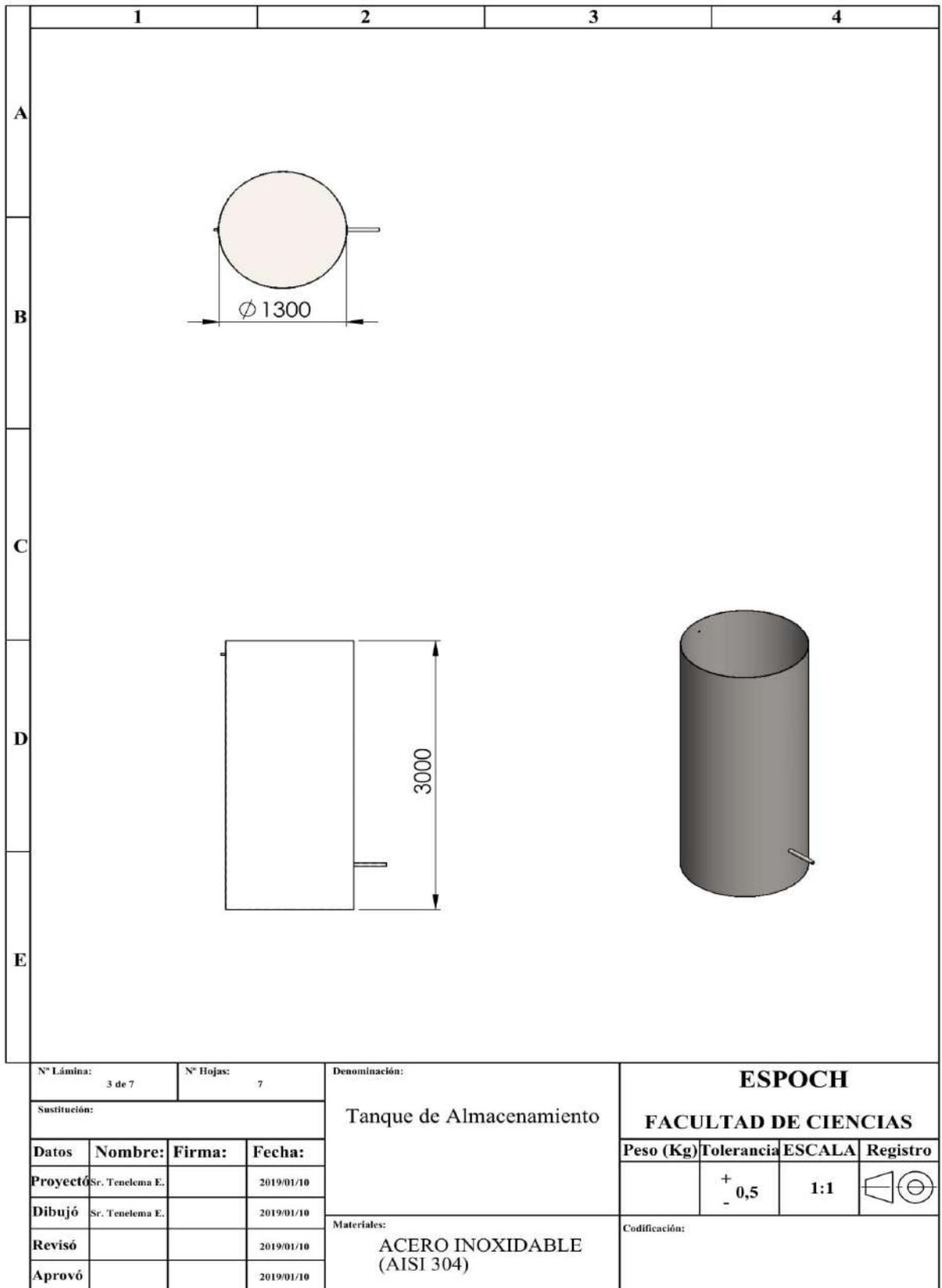
N° Lámina: 4 de 7		N° Hojas: 7		Denominación:		ESPOCH			
Sustitución:				Celda de Electrocoagulación		FACULTAD DE CIENCIAS			
Datos	Nombre:	Firma:	Fecha:			Peso (Kg)	Tolerancia	ESCALA	Registro
Proyectó	Sr. Tenclema E.		2019/01/10				$\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 0,5$	1:1	
Dibujó	Sr. Tenclema E.		2019/01/10			Materiales:		Codificación:	
Revisó			2019/01/10			Metacrilato de Metilo			
Aprovó			2019/01/10						

Anexo Q: Dimensiones del electrodo de aluminio

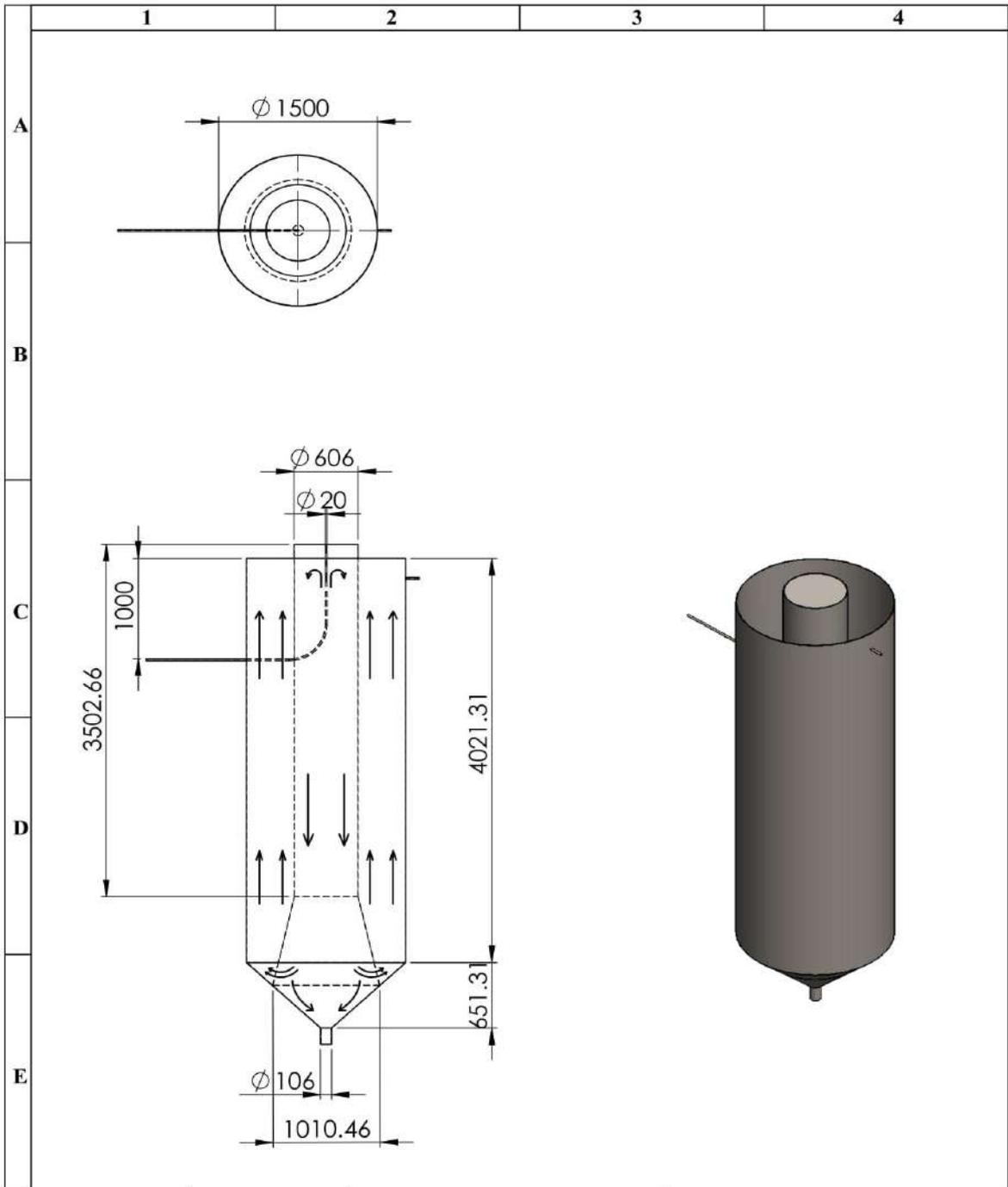


N° Lámina: 5 de 7		N° Hojas: 7		Denominación:		ESPOCH			
Sustitución:				Electrodo		FACULTAD DE CIENCIAS			
Datos	Nombre:	Firma:	Fecha:			Peso (Kg)	Tolerancia	ESCALA	Registro
Proyectó	Sr. Tenelema E.		2019/01/10	Aluminio			+ - 0,5	1:1	
Dibujó	Sr. Tenelema E.		2019/01/10			Codificación:			
Revisó			2019/01/10						
Aprovó			2019/01/10						

Anexo R: Dimensiones del tanque de almacenamiento

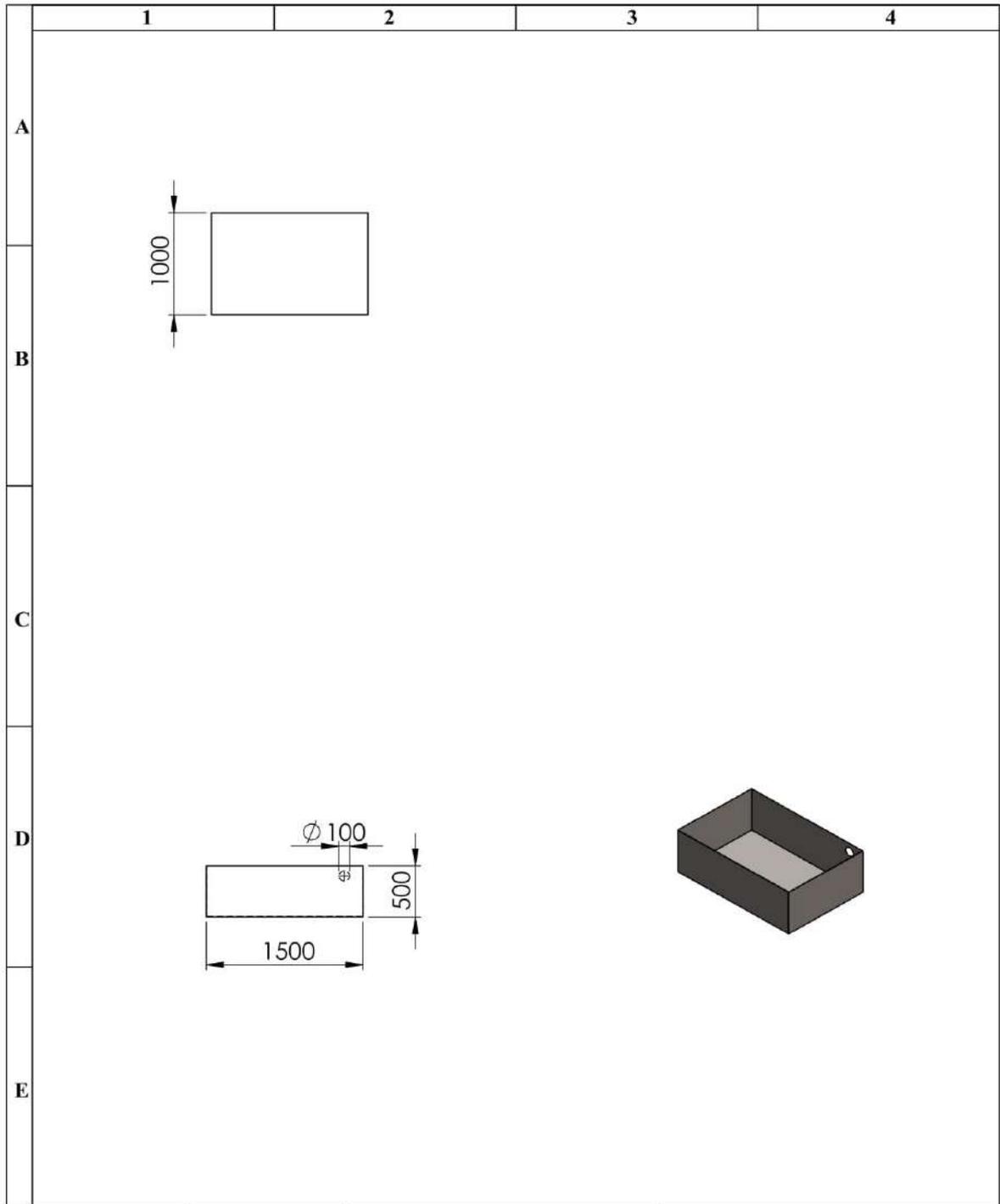


Anexo S: Dimensiones del sedimentador cónico



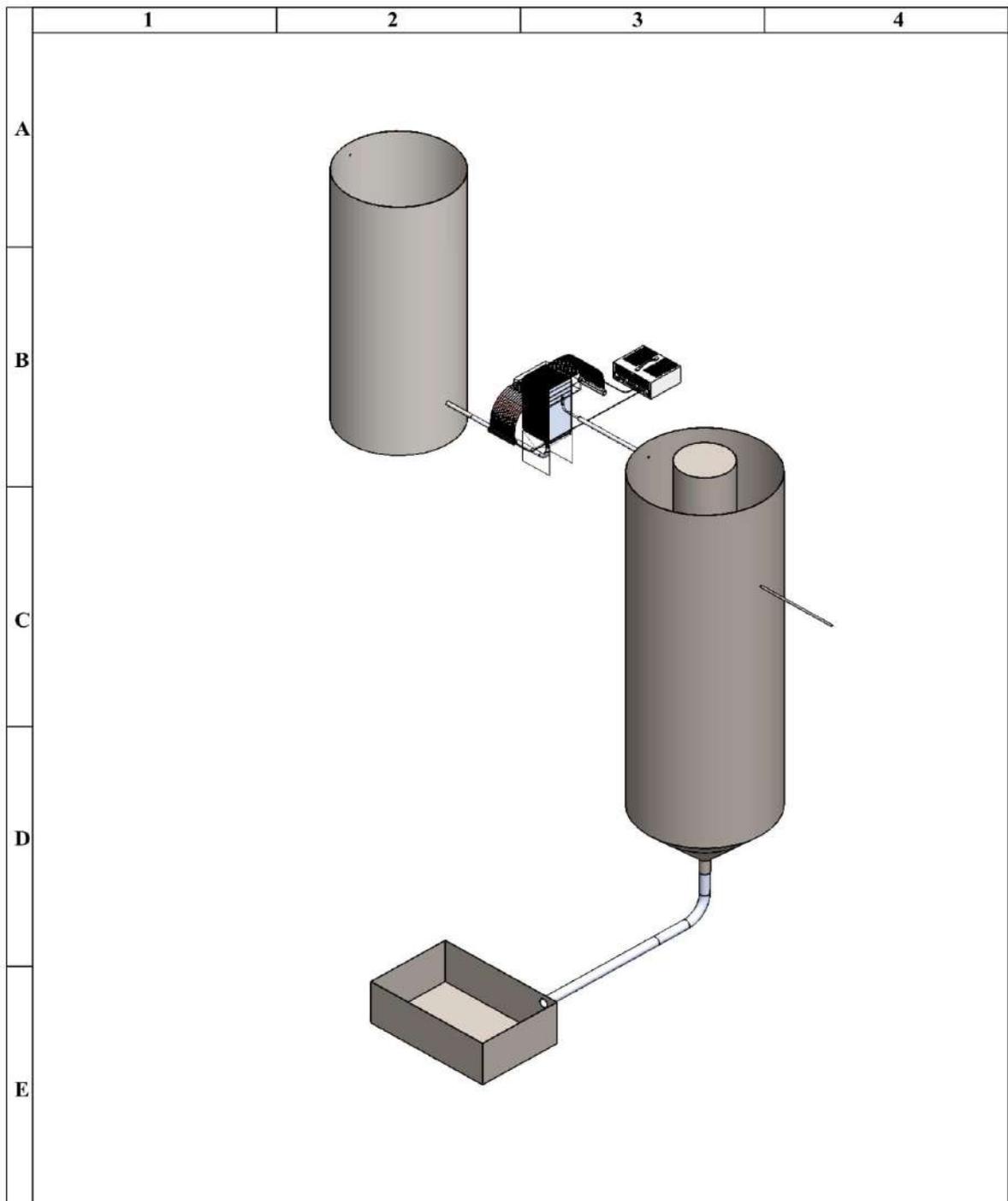
N° Lámina: 6 de 7		N° Hojas: 7		Denominación:		ESPOCH				
Sustitución:				Sedimentador Circular		FACULTAD DE CIENCIAS				
Datos	Nombre:	Firma:	Fecha:			Peso (Kg)	Tolerancia	ESCALA	Registro	
Proyectó	Sr. Tenelema E.		2019/01/10				$\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 0,5$	1:1		
Dibujó	Sr. Tenelema E.		2019/01/10							
Revisó			2019/01/10	Materiales:		Codificación:				
Aprovó			2019/01/10							
				ACERO INOXIDABLE (AISI 304)						

Anexo T: Dimensiones de la era de secado



N° Lámina: 7 de 7		N° Hojas: 7		Denominación:		ESPOCH			
Sustitución:				Era de Secado		FACULTAD DE CIENCIAS			
Datos	Nombre:	Firma:	Fecha:			Peso (Kg)	Tolerancia	ESCALA	Registro
Proyectó	Sr. Tenelema E.		2019/01/10	Materiales: ACERO INOXIDABLE (AISI 304)			+ - 0,5	1:1	
Dibujó	Sr. Tenelema E.		2019/01/10			Codificación:			
Revisó			2019/01/10						
Aprovó			2019/01/10						

Anexo U: Sistema de tratamiento de aguas residuales



N° Lámina: 1 de 7		N° Hojas: 7		Denominación:		ESPOCH					
Sustitución:				Ensamble del Sistema		FACULTAD DE CIENCIAS					
Datos	Nombre:	Firma:	Fecha:			Peso (Kg)	Tolerancia	ESCALA	Registro		
Proyectó	Sr. Tenelema E.		2019/01/10				+ - 0,5	1:1			
Dibujó	Sr. Tenelema E.		2019/01/10			Materiales:		Codificación:			
Revisó			2019/01/10								
Aprovó			2019/01/10								