



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DISEÑO DE UN SISTEMA DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el Título de Ingeniero Ambiental en Prevención y
Remediación.

Profesor guía

MSc. Santiago Daniel Piedra Burgos

Autora

Daniela Stephanía Garcés Vinueza

Año

2019

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

Declaro haber dirigido el trabajo, 'Diseño de un sistema de coagulación – floculación para el tratamiento de aguas residuales.', a través de reuniones periódicas con el estudiante, Daniela Stephanía Garcés Vinueza, en el semestre 201920, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.

Santiago Daniel Piedra Burgos
Master of Science in Hydro Science and Engineering
CC: 171538415-0

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

Declaro haber revisado el trabajo, 'Diseño de un sistema de coagulación – floculación para el tratamiento de aguas residuales.', del estudiante Daniela Stephanía Garcés Vinuesa, en el semestre 201920, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.

Daniel Hernán Hidalgo Villalba
Magister en Ciencias, Especialización Ingeniería Ambiental
CC: 180191444-9

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.

Daniela Stephanía Garcés Vinueza

CC: 0604007255-3

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera especial a toda mi familia, A mis amigos incondicionales, a AG quienes han sido de gran sostén y ayuda en varios momentos decisivos y difíciles, atravesados durante mi formación como ser humano y profesional.

A mis profesores y de manera especial a: Ing. Santiago Piedra, mi profesor guía, al Ing. Santiago Solórzano, Ing. José Toscano e Ing. Omar Flor, por su cooperación en la realización de este proyecto, al Ing. Daniel Hidalgo, Ing. Pavlova Sigcha, Ing. Christian Villamarín e Ing. Yasser Gonzáles, quienes con sus conocimientos me brindaron soporte e incentivo para continuar realizando hasta el final este trabajo.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre, por ser el pilar que me ha sostenido cada día durante este largo proceso; a mi padre, quien me impartió y compartió varios de sus conocimientos, siendo de mucha ayuda en momentos de confusión y a mi hermano, quien ha sido un modelo de perseverancia y rectitud durante toda mi vida. Gracias por siempre estar a mi lado, brindarme su amor y creer en mí. Ninguno de mis logros y metas alcanzadas serían posibles ni estarían completas sin ustedes.

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el diseño de un sistema piloto, que participe en la remoción de turbidez y color de aguas residuales, esto con el fin académico y pedagógico de lograr la instalación de un equipo didáctico que ayude a la comprensión del proceso de coagulación y floculación en el tratamiento de las aguas residuales.

Los conceptos y criterios de diseño utilizados, requirieron de un análisis teórico previo, para determinar su relevancia. Además, se ejecutaron pruebas que permitieron la determinación de varios parámetros importantes como tipo y cantidad de coagulante y floculante, gradiente y tiempo óptimos de floculación, de manera que se garantice el funcionamiento eficiente y eficaz del sistema. Dichos parámetros tuvieron incidencia en los cálculos realizados y el modelamiento del piloto diseñado y construido.

Por otra parte, el material con el cual el sistema está conformado que es acrílico de 9 mm, presenta altas capacidades de durabilidad y resistencia por lo que supone ser el material idóneo que soporte el peso y presión que el agua produce en el interior del sistema y además, se adaptó un sistema electrónico completo, el cual dió movimiento a las turbinas giratorias que se encargan de la mezcla rápida y lenta para la coagulación y floculación, respectivamente.

Dentro de los resultados se obtuvo que las dimensiones que conforman el tanque coagulador (0.34 m x 0.34 m x 0.34 m), el cual se encarga de la mezcla rápida a una velocidad de 100 rpm durante 1 minuto; y, el tanque floculador bicameral (1.2 m x 0.6 m x 0.6 m), mismo que se realiza la mezcla lenta a una velocidad de 40 rpm durante 6.5 minutos; contienen un volumen total de agua de 0.428 m³ y funcionan de manera óptima con un caudal de 40 l/min. Por otro lado, el sistema mostró gran capacidad en la remoción de turbidez y color de un agua residual utilizada para evidenciar en la realización de las pruebas de funcionamiento del sistema diseñado, como paso final del trabajo.

ABSTRACT

The present work developed the design of a pilot system that removes turbidity and color of wastewater. This for the academic and pedagogical purpose of achieving the installation of a didactic equipment, that provides the comprehension of coagulation and flocculation processes during wastewater treatment.

The used concepts and design criteria, required a prior theoretical analysis to determine their relevance. In addition, tests were carried out that allowed the determination of several important parameters such as the type and amount of coagulant and flocculant, optimal flocculation time and gradient, in order to guarantee the efficient and effective functioning of the system. These parameters had an impact on the calculations performed and the modeling of the designed and built pilot.

On the other hand, the material with which the system is formed that is 9 mm acrylic, has high durability and resistance capabilities so it is the ideal material to support the weight and pressure that water produces inside the system. In addition, a complete electronic system was adapted, which gave movement to the rotary turbines that are responsible for the fast and slow mixing for coagulation and flocculation, respectively.

Among the results it was obtained that the dimensions that make up the coagulator tank (0.34 m x 0.34 m x 0.34 m), which is responsible of the fast mixing at a speed of 100 rpm for 1 minute; and, the bicameral flocculator tank (1.2 m x 0.6 m x 0.6 m), the same which does slow mixing at a speed of 40 rpm for 6.5 minutes; they contain a total water volume of 0.428 m³ and work optimally with a flow rate of 40 l / min. On the other hand, the system showed great capacity in the removal of turbidity and color of a wastewater used in the performance tests of the designed system, as the final step of the work.

ÍNDICE

1. Capítulo I. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Alcance	3
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo General.....	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
2. Capítulo II. Marco Teórico.....	5
2.1. Aguas Residuales.....	5
2.1.1. Clasificación de las Aguas Residuales	5
2.2. Tratamiento de aguas residuales	6
2.3. Tipos de tratamiento de aguas residuales.....	6
2.4. Tratamiento Preliminar	7
2.5. Tratamiento Primario	7
2.5.1. Coagulación.....	8
2.5.2. Floculación	11
2.5.3. Dimensiones de propellers	14
2.5.4. Presiones al interior del tanque	15
3. Capítulo III. Metodología.....	16
3.1. Diseño	16
3.1.1. Pruebas y cálculos de diseño	16
3.1.2. Cálculos.....	22
3.2. Construcción del sistema.....	24
3.2.1. Construcción de tanques	24
3.2.2. Construcción de estructuras de soporte y propellers.....	25
3.2.3. Construcción del sistema electrónico propulsor.....	26
3.3. Pruebas Hidráulicas del sistema.....	27
4. Capítulo IV. Resultados y Discusión.....	28

4.1. Diseño	28
4.1.1. Pruebas de jarras	28
4.1.2. Dimensionamiento de tanques	33
4.1.3. Floculación	35
4.1.4. Dimensionamiento de propellers	36
4.1.5. Presiones ejercidas en el interior del tanque	38
4.2. Construcción del sistema.....	39
4.2.1. Construcción de tanques	39
4.2.2. Construcción de estructuras de soporte	41
4.2.3. Propellers	44
4.3. Pruebas hidráulicas del sistema	46
4.3.1. Pruebas de Estanqueidad	46
4.3.2. Pruebas de funcionamiento	47
5. Conclusiones y Recomendaciones.....	50
5.1. Conclusiones.....	50
5.2. Recomendaciones.....	51
REFERENCIAS	52
ANEXOS	56

1. Capítulo I. Introducción

1.1. Antecedentes

El uso de abundantes cantidades de agua en los procesos y actividades antrópicas de diferente tipo, ocasiona la descarga de las mismas, originándose así el problema mundial que representan las aguas residuales provenientes de cada actividad, y que al descargarlas generan un impacto negativo en la calidad del agua de fuentes naturales (cuerpos receptores) o en los ecosistemas en general (Ortiz-Oliveros y Flores-Espinosa, 2003). En la actualidad, es importante para la sociedad y los seres humanos realizar un tratamiento apropiado de las aguas residuales, debido a que el concepto de “el que contamina paga”, ha causado impacto en la conciencia de la sociedad. Hoy en día las empresas y las personas en general muestran preocupación por mitigar o tratar de forma adecuada sus efluentes (Gómez Zamora, 2015).

En el campo de acción; del tratamiento de aguas residuales, se realizan varios procesos antes de considerar que el agua es apta para ser liberada al ambiente o a su vez para usarla en consumo u otras actividades antrópicas y es por esto que el método de coagulación - floculación, el cual es considerado como un tratamiento primario de las aguas residuales con altas cantidades de sólidos suspendidos y que provocan turbiedad y color en las mismas, es implementado en las plantas de tratamiento, en busca de la mejora de la calidad de dichas aguas (Gómez Puentes, 2005). Además, el tratamiento de aguas residuales con fines de reúso es un tema de actualidad debido a que van en aumento los problemas de escasez y contaminación; de las fuentes destinadas a la producción de agua potable o para otros usos. Sin embargo, no todas las aguas poseen las mismas características, de modo que en algunos casos se opta por la adición de otro tipo de tratamientos, como el biológico, el cual ayuda a la reducción de altas cargas de materia orgánica presente en el agua (Lorenzo Acosta, 2006).

En trabajos anteriores, se ha podido comprobar la efectividad de los sistemas de coagulación – floculación, empleados para el tratamiento de aguas residuales que presentaban turbidez debido a la cantidad de sólidos suspendidos que estas contenían, es así que, un estudio realizado en Colombia reveló que se logra una efectiva remoción cuando el pH del agua a ser tratada es ácido, de tal manera que dicha condición puede variar de acuerdo al tipo de coagulante a utilizarse (entre pH=5 y pH=4). Realizando pruebas a escala real determinaron que la efectividad en remoción de: turbiedad fue del 37 y 49%; para DQO entre 38 y 48%; y, en Sólidos Suspendidos Totales (SST) entre el 60 y 71% (Gómez Puentes, 2005).

En otro estudio similar se elaboraron diagramas de coagulación y floculación para dos condiciones: a) Cloruro Férrico (FeCl_3) con eficiencias de remoción de turbiedad entre 13% y 98% utilizando dosificaciones entre 2 y 160 mg/l, alcanzando valores de pH de coagulación (pHCoag) entre 3, 6 y 9; y, b) se adicionó de a poco FeCl_3 como coagulante primario, en dosis que variaron entre 2 y 165 mg/l y un polímero aniónico (ayudante de floculación), llegando a obtener valores de pHCoag entre 3.8 y 9.7; con eficiencias que van entre el 22% y el 98%. Adicionalmente, las eficiencias de remoción registradas de SST, van por encima de valores del 70% con dosis de 15 mg/l en el rango del pHCoag obtenido y mencionado anteriormente. Eficiencias de remoción cercanas al 80% fueron obtenidas, del diagrama con dosis de FeCl_3 y polímero de 13 mg/L y 0.2 mg/L respectivamente, en las regiones de adsorción y neutralización de carga y barrido. Por otro lado, se menciona que existieron eficiencias superiores al 40% con dosis de 15 mg/l de FeCl_3 , al aplicar coagulante dentro del rango de pH que se evaluó. Además, con la misma dosis de coagulante y la adición de 0.2 mg/l de polímero se obtuvieron remociones de materia orgánica (DQO) que superan el 67%, en la región de coagulación por barrido, de esta forma, se consideró que la coagulación por barrido es la más adecuada, debido a que el pH no debe ser modificado evitando así la adición de químicos al agua. Por otro lado, con una mezcla lenta de 40 rpm en 10 minutos y 110 rpm en 3 minutos, con 24.5 mg/l de

FeCl₃ y 0.1 mg/l de polímero, aplicando 5 minutos de sedimentación, se lograron eficiencias del 65% y 66% para DQO y SST respectivamente (Escobar, 2003).

De este modo, se debe resaltar que el beneficio que se obtiene del uso de sistemas de coagulación - floculación es el de remover altas cantidades de turbidez (SST) en las aguas residuales que van a ser tratadas, sin que se necesiten altas cantidades de químicos para lograr este objetivo.

1.2. Alcance

El presente estudio pretendió diseñar un sistema piloto de coagulación - floculación para el tratamiento de aguas residuales en relación a las limitaciones de espacio y costo. Se realizó una evaluación de funcionamiento mediante las pruebas hidráulicas correspondientes, para comprobar que el caudal utilizado mantenga a un nivel óptimo el funcionamiento del sistema.

1.3. Justificación

El agua es un recurso indispensable para el ser humano, debido a que su estilo de vida la hace necesaria para varios usos como: alimentación, higiene personal, turismo, actividades recreativas, etc. La mayoría de aguas residuales producidas dentro del país, no son tratadas de manera adecuada y se las descarga de manera directa a los cuerpos hídricos superficiales, causando contaminación de este recurso (Carrión Cruz, 2016). Es por esto que la necesidad de tratar las aguas residuales de distinta procedencia es importante, evitando así que la escasez el recurso pueda causar serias afecciones en la vida del hombre y también en el medio ambiente. La manera más efectiva de asegurar la depuración de las aguas residuales es mediante el sometimiento de las mismas a sistemas de tratamiento que pueden ser ejecutados dentro de una planta de tratamiento (Valencia López, 2013).

El municipio del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), con el objetivo de eludir impactos ambientales que se puedan presentar en sus cuerpos de agua, ordena

que las industrias cumplan con las normas y leyes, que han establecido los límites permisibles en cuanto a la descarga de contaminantes que puede presentar un efluente (Chamorro, 2013).

Para alcanzar el mencionado objetivo, el primer paso que algunas de las industrias han dado, es el de alojar dentro de sus instalaciones plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), en las cuales se busca disminuir el impacto ambiental debido al efluente producido y de esta manera, lograr el cumplimiento de las normas correspondientes. Dentro de los primeros procesos que se tiene en cuenta realizar, para la disminución de la contaminación del agua se encuentra el proceso de coagulación - floculación que reduce notablemente la cantidad turbidez, color, DQO y SST en las aguas residuales (Carrión Cruz, 2016).

La UDLA al ser una entidad que recibió el premio a la Distinción Ambiental Metropolitana "**Quito Sostenible**", evento organizado por la Secretaría de Ambiente, se esfuerza por mantener la reducción de su huella ecológica e implementar buenas prácticas ambientales dentro de cada uno de sus campus. Un modelo indiscutible de este hecho es el nuevo campus de la universidad, UDLAPark, en el que dentro de sus proyectos ambientalmente amigables, se ha instalado una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) (UDLA, 2016). Siguiendo este camino, los proyectos que se realicen por los estudiantes o docentes de la universidad para la mejora del funcionamiento de esta planta, le brindarán un valor agregado a la calidad del agua que es tratada, los usuarios y en general al medio ambiente, manteniendo así la calidad educativa y los estándares académicos que direccionan a los jóvenes hacia una conciencia de cuidado del medio ambiente.

Es por estos motivos que, la implementación de un sistema de coagulación - floculación en una planta de tratamiento de aguas residuales, es muy importante para lograr una mayor efectividad en el proceso de la mejora de la calidad del agua.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar un Sistema de Coagulación - Floculación para el tratamiento de aguas residuales.

1.4.2. Objetivos específicos

- ✓ Encontrar las dimensiones óptimas del sistema en función de las restricciones por espacio y costo.
- ✓ Hallar el caudal de la unidad de modo que el tratamiento se mantenga en un nivel óptimo.

2. Capítulo II. Marco Teórico

2.1. Aguas Residuales

Se definen como aguas residuales a aquellas cuyas características naturales han sido modificadas por actividades antrópicas, de modo que, por su calidad es obligatorio que reciban un tratamiento previo a su reúso o descarga a sistemas de alcantarillado o cuerpos hídricos naturales (OEFA, 2014).

2.1.1. Clasificación de las Aguas Residuales

Según la OEFA (2014), existen aguas residuales de tres tipos:

- **Industriales:** Son aquellas aguas que se derivan de la realización de algún proceso productivo, entre ellas se puede mencionar a las provenientes de actividad energética, agroindustrial, agrícola, minera y otras.
- **Domésticas:** Estas aguas tienen su origen en residencias y comercios, y se derivan de las necesidades fisiológicas, actividad de limpieza, entre

otras que se realiza en la cotidianidad del ser humano, y que requieren de un adecuado tratamiento previo a su disposición en fuentes acuíferas naturales.

- **Municipales:** Son todas aquellas aguas que provienen de los asentamientos humanos y que son una mezcla de las aguas residuales domésticas e industriales, en algunos casos, y en otros pueden contener aguas provenientes de las lluvias que se han presentado en el sector. Adicionalmente, deben ser tratadas de manera que puedan ser descargadas sin inconvenientes a los sistemas combinados de alcantarillado.

2.2. Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales supone el uso de procesos físicos, químicos y/o biológicos, de forma que los contaminantes que persistan en el fluido, se encuentren en cantidades permisibles dentro de las normas establecidas. A lo largo del proceso de depuración, existen dos factores que se deben considerar: a) el tipo de contaminantes presentes y b) el orden de eliminación de estos (Martín García, 2006).

2.3. Tipos de tratamiento de aguas residuales

Los distintos tratamientos que tienen lugar para la depuración de aguas residuales se muestran en la Figura 1.



Figura 1. Tipos de tratamiento para aguas residuales, con sus objetivos.

Tomado de (Alianza por el Agua, 2008)

2.4. Tratamiento Preliminar

Es el tratamiento que acondiciona o prepara el agua residual de manera que se proteja el funcionamiento, las instalaciones y se elimine ligeramente las cargas de contaminantes que pueda tener el agua a ser tratada (Rojas, 2002).

2.5. Tratamiento Primario

Es el tratamiento en el que se remueve, por medios mecánicos o físicos, una parte importante de los sólidos suspendidos o sedimentables e incluso materia orgánica del agua. Los porcentajes de reducción de DBO pueden ser entre el 25 y 40% y en sólidos suspendidos entre 50 y 65% (Rojas, 2002).

Como se describe en la *Figura 1* el tratamiento de coagulación - floculación es considerado primario para la depuración de aguas residuales.

2.5.1. Coagulación

Según Andía Cárdenas (2000), la coagulación es el proceso en donde se produce la desestabilización química, de las partículas coloidales que se mantienen separadas cuando no se ha producido la neutralización de fuerzas en el agua. Se lo realiza con la adición de coagulantes químicos y aplicando una energía de mezclado (mezcla rápida).

La desestabilización de las partículas puede darse por 4 mecanismos, los cuales son:

- Compresión de la doble capa.
- Adsorción y neutralización de cargas.
- Atrapamiento de partículas en un precipitado.
- Adsorción y puente.

2.5.1.1. Coagulante

De acuerdo con Andía Cárdenas (2000), Los coagulantes son sustancias químicas que producen una reacción en cadena al entrar en contacto con los agentes químicos del agua, principalmente la alcalinidad del agua, de modo que se generen partículas precipitables voluminosas constituidas en su mayoría por el compuesto químico (coagulante) utilizado.

Los principales coagulantes que se conocen se utilizan son:

- Cloruro Férrico.
- Sulfato de Aluminio.
- Cloruro de Aluminio.
- Aluminato de Sodio.
- Sulfato Ferroso.
- Sulfato Férrico.

Los iones trivalentes de Al y Fe, principalmente, son los encargados de reaccionar con las 6 moléculas de los oxígenos circundantes de agua y debilitan la asociación oxígeno-hidrógeno, de manera que los átomos de hidrógeno son apartados de la solución en un proceso que se denomina hidrólisis, en el cual se generan nuevos productos, en su mayoría, hidróxidos metálicos (Rojas, S. y Torrado, D.; 2007).

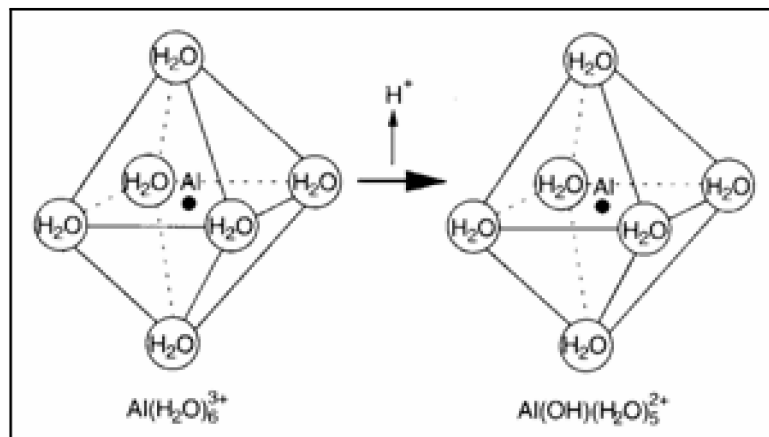


Figura 2. Desprotonación del ión aquo alúmina, paso inicial de la hidrólisis de Al. Tomado de (Rojas, S. y Torrado, D.; 2007)

2.5.1.2. Factores que influyen en el proceso de coagulación

- **Concentración óptima de coagulante:** Debido a que la concentración en la solución de coagulante que se utilizará para el proceso influye sobre la mezcla rápida, y por ende en la coagulación, se debe encontrar el punto óptimo de dicha solución (INEN, 1992).
- **Dosis óptima de coagulante:** Es la dosis de coagulante que permite la desestabilización más rápida de las partículas y que genera la formación de partículas coloidales de tamaño y peso adecuado para poder sedimentar, de manera que, al pasar por filtros éstas no se rompan. Esta dosis del compuesto químico a utilizarse, varía de acuerdo a las características de turbiedad del agua a ser tratada (INEN, 1992).

- **pH óptimo:** Es el rango óptimo de pH que permite una coagulación idónea en el agua a ser tratada, teniendo en cuenta el tipo de coagulante que se utiliza y el costo que implica la realización de las pruebas correspondientes (INEN, 1992).

2.5.1.3. Volumen de tanque de mezcla rápida

El volumen del tanque representa la cantidad de agua que acogerá el mismo en su interior, durante el proceso de coagulación, en el cual se utiliza la mezcla rápida. Para su cálculo se utiliza la siguiente fórmula:

$$V = Q * t$$

(Ecuación 1)

Donde:

V= Volumen del tanque (m³) (Crittenden, Rhodes, Hand, Howe, y Tchobanoglous, 2012, pp. 541-636).

Q= Caudal definido en 40 L/min según bibliografía (Fierro, 2018).

t= Tiempo del tratamiento (1 min).

2.5.1.4. Longitud de tanque de mezcla rápida

Asumiendo que dicho tanque debe ser un cubo, se utiliza la medida de la longitud para las tres dimensiones que debería tener dicho tanque. Para calcular la longitud mencionada, se utiliza la siguiente fórmula:

$$L = \sqrt[3]{V}$$

(Ecuación 2)

Donde:

L= Longitud (m)

V= Volumen del tanque (m³)

(Crittenden et al., 2012, pp. 541-636)

2.5.2. Floculación

Es el proceso que se realiza a continuación de la coagulación y que consiste en agitar el agua que ya ha coagulado, de manera que se permita la aglomeración de los flóculos que apenas se han formado, generando así masas de tamaño y peso adecuado para poder sedimentar más fácilmente. Este proceso debe ser realizado con bajas velocidades de mezcla de modo que se no se rompan los flóculos, dado que una vez que esto sucede es muy difícil que éstos se vuelvan a aglomerar (Andía Cárdenas, 2000).

Existen dos tipos de floculación: a) Pericinética, la cual se produce debido al movimiento natural (movimiento browniano) de las moléculas del agua y que es inducida por la energía térmica; y, b) Ortocinética, que es la colisión de las partículas debido al movimiento del agua y el cual es inducido por energía exterior a la masa del agua, puede ser de origen mecánico o hidráulico. Finalmente, para que se produzca la aglutinación de los microflóculos, presentes en el agua ya coagulada, la floculación pericinética debe ser la primera en ocurrir, seguida de la floculación ortocinética (Andía Cárdenas, 2000).

2.5.2.1. Floculante

Un floculante o ayudante de floculación es un reactivo que se adiciona y puede ser muy útil en mejorar el proceso, de modo que se facilite la formación de flóculos más grandes y que posean la característica particular de ser fácilmente sedimentables (Andía Cárdenas, 2000). Entre los floculantes más comunes podemos mencionar:

- **Polímeros:** Estos compuestos con orgánicos e inorgánicos y pueden tener carga eléctrica, de modo que se los denomina como polielectrolitos. En el caso de que sean positivos, se los conoce como polímeros catiónicos, mientras que si son negativos, se los conoce como polímeros aniónicos. Los más utilizados son los catiónicos, debido a que los coloides presentes en el agua suelen ser aniónicos. Por otro lado, se debe tener

en cuenta de que su uso es limitado en casos de potabilización del agua, dado que pueden llegar a ser tóxicos. Además, los polielectrolitos se dividen en dos tipos según su origen: a) naturales, como el almidón, alginatos, celulosa, etc.; y, b) sintéticos, los cuales están formados por monómeros simples que al polimerizarse, forman cadenas largas cuya característica principal es su muy alto peso molecular (Suárez, 2014).

- **Sílice Activada:** Es aquella que se obtiene del procesamiento del ácido silícico y que en solución se convierte en ácido polisilícico, además se conoce que es poco estable, por lo que la mejor manera de prepararla es “in situ” y comúnmente se la suele utilizar en soluciones entre el 0.5% y 1% (Suárez, 2014).

2.5.2.2. Volumen de flóculos

Es el volumen existente de flóculos dentro de cada unidad de volumen de agua.

Se lo calcula mediante la fórmula:

$$\Omega = \frac{\pi d_i^3 n_i}{6}$$

(Ecuación 3)

Donde:

Ω = floc por unidad de volumen de solución cm^3/L

d_i = diámetro de la partícula (cm)

n_i = número de concentración de partículas (L^{-1})

(Crittenden et al., 2012)

2.5.2.3. Tiempo medio de floculación

Es el tiempo necesario para que la floculación ocurra de manera adecuada dentro de los tanques, formando los flóculos de tamaño y peso precisos para su posterior decantación. Para calcular este tiempo se utiliza la ecuación del tiempo de vida media:

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{-\pi \ln(0.95)}{4\alpha\Omega\bar{G}}$$

(Ecuación 4)

Donde:

α = Factor de eficiencia de colisión de partículas (entre 0 y 1)

Ω = floc por unidad de volumen de solución cm³/L

\bar{G} = Gradiente de velocidad (s⁻¹)

(Crittenden et al., 2012)

2.5.2.4. Tamaño de la partícula fractal

La dimensión de las partículas fractales D, es utilizada para describir el volumen fractal, teniendo en cuenta las diferentes formas de las partículas. Dependiendo de las condiciones de suspensión, se pueden formar diferentes agregados con dimensiones fractales distintas.

$$\text{Volumen} \propto n_p^D$$

La dimensión fractal D proporciona información general acerca de la forma del agregado que se ha conformado durante el proceso de floculación.

Para calcular el tamaño de la partícula fractal se debe utilizar las siguientes fórmulas:

$$\text{Volumen del agregado} = \frac{4}{3}\pi * (0.315\mu\text{m})^3 * \frac{N_{\text{departagreg}}}{\text{porosidad}}$$

(Ecuación 5)

$$da = 2 \left(\frac{3}{4\pi} * \text{Volumen del agregado} \right)^{\frac{1}{3}}$$

(Ecuación 6)

Donde:

$N_{\text{departagreg}}$ = Número de partículas que conformarán el agregado.

Porosidad= Espacios libres que dejaran los agregados entre sí al aglomerarse.

da= Diámetro del agregado
(Crittenden et al., 2012)

2.5.3. Dimensiones de propellers

Tabla 1.

Criterios de diseño claves para floculador de turbina vertical

Parameter	Range	Definition Sketch
Impeller	Hydrofoil or 45° pitched-blade turbine (PBT), hydrofoil preferred	
D/T_e^2	0.3–0.6, 0.4–0.5 preferred	
H/T_e	0.9–1.1	
C/H	0.5–0.33	
N	10–30 rev/min	
Tip speed	2–3 m/s	

Tomado de (Crittenden et al., 2012)

Generalmente, lo más recomendable es que cuando se utilizan impulsores de turbina vertical el diseño de la cámara sea cúbico y que dicho impulsor este ubicado a una profundidad aproximada de dos tercios del total de la altura de la cámara (Crittenden et al., 2012).

2.5.3.1. Diámetro de propellers

Para determinar el diámetro preciso del impulsador de forma que se genere la mezcla completa dentro de la cámara, sin generar turbulencia que podría romper los floculos, se utilizan las siguientes fórmulas:

$$Te = \sqrt{\frac{4 * Aplan}{\pi}}$$

(Ecuación 7)

$$Aplan = L^2$$

(Ecuación 8)

$$D = 0.45Te$$

(Ecuación 9)

Donde:

Te= Ancho total de la cámara (m)

Aplan= Área plana de la cámara (m²)

L²= Longitud del tanque (m), elevada al cuadrado

D= Ancho total de la turbina (m)

(Crittenden et al., 2012)

2.5.4. Presiones al interior del tanque

La presión que ejerce el agua al interior de un tanque, está directamente relacionada con la densidad del fluido, la altura a la que se encuentra y la aceleración de la gravedad, por lo que la fórmula de cálculo de las diferentes presiones ejercidas es la siguiente:

$$P = \rho * g * \Delta H$$

(Ecuación 10)

Donde:

P= Presión (Pa).

ρ = Densidad del fluido (kg/m³).

g= Aceleración de la gravedad (9.807 m/s²).

ΔH = Diferencia de altura entre 2 puntos (m).

(Crittenden et al., 2012)

3. Capítulo III. Metodología

3.1. Diseño

El diseño del modelo didáctico experimental se realizó según diferentes criterios especificados por varios autores (Crittenden et al., 2012; Ahumada Theoduloz, 2011; Eaton, A. y Franson, M., 2012; Metcalf & Eddy, Inc., 2014; Fierro, 2018), mismos que permitieron que se logre definir las bases de diseño a seguirse. El caudal que se eligió para el diseño del presente sistema (40 l/min), se lo definió de acuerdo a lo especificado por uno de los autores ya antes mencionados, y que, además, depende de las limitaciones de espacio y presupuesto existentes para la realización del modelo.

Por otro lado, el material que se utilizó para la construcción del sistema, es acrílico transparente de 9 mm de espesor, el cual presenta cualidades de alta resistencia y durabilidad, además de otra ventaja añadida, dado que permitió que se efectúe la clara visualización del funcionamiento del sistema, cuando este fue puesto en marcha.

3.1.1. Pruebas y cálculos de diseño

3.1.1.1. Pruebas de jarras

Para la realización de las pruebas de jarras, que ayudaron en la definición de ciertos parámetros como el gradiente de velocidad, mismo que fue usado dentro de algunos cálculos para el diseño del sistema, se utilizó una metodología que combinó lo mencionado por Eaton, A. y Franson, M. (2012) y Metcalf & Eddy, Inc. (2014).

Adicionalmente, cabe mencionar que el agua residual utilizada para la realización de todas estas pruebas fue de tipo sintética y su composición se encuentra descrita en la Tabla 2.

Tabla 2.

Composición de agua residual sintética

Ingredientes	Cantidades para	Cantidades para
	1 l (g/l)	18 l (g/l)
Almidón de yuca	0.1000	1.8
Gelatina	0.0342	0.612
Leche en polvo	0.2000	3.6
Jabón líquido	0.0033	0.054
Azúcar	0.1710	3.078
Bicarbonato	0.1504	2.701
Fosfato de Potasio (K₂PHO₄)	0.0440	0.800
Sulfato de Amonio ((NH₄)₂SO₄)	0.0744	1.336
Sulfato de Magnesio (MgSO₄)	0.0033	0.054

Adaptado de (Pacheco, 2015)

Previo a la realización de los procedimientos que se enmarcan dentro de estas pruebas, se determinaron las características del agua cruda en cuanto a temperatura, color, pH y turbidez con la ayuda de equipos especializados (Macherey – Nagel , Nanocolor D500 y Hanna Instruments HI 2550).

a) Determinación de la dosis óptima de coagulante

El coagulante que se utilizó para las pruebas fue Policloruro de Aluminio (PCA) comercial, el mismo que se encuentra en una concentración lista para su uso, siendo un producto químico de presentación líquida, dicha concentración es del 18% y posee la capacidad de diluirse por completo en el agua. Además, es bien conocido que el PCA es muy utilizado en la industria para el tratamiento de aguas residuales y agua potable (Simar S.A., 2010), motivos por los cuales se lo eligió como el producto más adecuado para la realización de las pruebas.

Por otro lado, se utilizaron cuatro jarras de 600 ml, en las cuales se colocó el agua residual sintética hasta completar los 400 ml. Cada jarra fue ubicada dentro del equipo de agitación (Pselecta – Flocumatic) y se procedió a poner en funcionamiento el mismo, a una velocidad de 100 rpm durante 1 minuto (mezcla rápida), paralelamente se realizó la adición de coagulante con la ayuda de una micropipeta (GLASSCO, de 100 a 1000 ul), en el centro de cada jarra y a una distancia de 5 cm por debajo de la superficie del agua, en dosis diferentes.

Posterior a la finalización del tiempo de mezcla rápida, se procedió a programar de forma inmediata al equipo para la mezcla lenta, la cual consistió en agitar el agua por un tiempo de 30 minutos a una velocidad de 40 rpm. Una vez terminado el tiempo de agitación, se retiraron las paletas del líquido de cada jarra y se dejó sedimentar por un tiempo de 1 hora para luego tomar la muestra a 5 cm debajo de la superficie y a un costado del líquido, con la ayuda de una micropipeta.

Las muestras tomadas fueron analizadas con la ayuda de un espectrofotómetro (Macherey – Nagel , Nanocolor D500) para la medición de color y turbidez final.

Tabla 3.

Pruebas de dosis óptima de coagulante

Pruebas de coagulante		
N° de prueba	N° de Jarra	Dosis usada (ul)
1	1	500
	2	1000
	3	2000
	4	4000
2	1	100
	2	200
	3	300
	4	400

b) Determinación de la dosis óptima de floculante

El floculante que se utilizó fue poliacrilamida, de la cual se prepararon 250 ml con una concentración del 0.01%.

Para la realización de las pruebas se colocaron 4 jarras con 400 ml de agua en cada una y se las situó dentro del equipo de jarras, luego se introdujeron las paletas en cada jarra y se adicionó la dosis óptima de coagulante, determinada en la prueba anterior, y diferentes dosis progresivas de floculante para cada jarra. Posteriormente, se repitió lo realizado para el coagulante con mezcla rápida de 100 rpm de un minuto y mezcla lenta de 40 rpm durante 30 minutos, con un tiempo de reposo de 1 hora antes de tomar las muestras para su análisis de color y turbidez.

Tabla 4.

Pruebas de dosis óptima de floculante

Pruebas de floculante		
N° de prueba	N° de Jarra	Dosis usada (ul)
1	1	50
	2	100
	3	150
	4	200

c) Ajuste de pH óptimo

Se colocó 400 ml de agua residual sintética en 4 jarras y con la ayuda de una bureta, se añadieron unos cuantos mililitros de soluciones de concentración 0.1 N de ácido sulfúrico (H_2SO_4) para bajar el pH, o hidróxido de sodio (NaOH) para subirlo. Después se dejó estabilizar el pH por 15 minutos y se comprobó que éste haya variado en cada jarra, de acuerdo a la solución añadida, con la ayuda del

equipo Hanna Instruments HI 2550, verificando que el pH se encuentre entre 5 y 6 la primera jarra y entre 8 y 9 la última jarra.

Se colocaron las jarras en el equipo (test de jarras) y se posicionaron las paletas giratorias en cada jarra, además se añadieron las dosis óptimas de coagulante y floculante, las cuales ya fueron previamente determinadas y se siguió el mismo procedimiento en cuanto a la mezcla del agua sometida y su posterior medición de turbidez y color.

Adicionalmente, para esta prueba se midió el pH final de cada jarra con la ayuda del mismo pHmetro (Hanna Instruments HI 2550).

Tabla 5.

Pruebas de pH óptimo

Pruebas de pH		
N° de prueba	N° de Jarra	pH inicial
1	1	6.5
	2	7.1
	3	7.8
	4	8.4

d) Determinación de tiempo y gradiente óptimos

Se colocó 400 ml de agua residual en las jarras y se las situó dentro del equipo de jarras, se añadieron las dosis óptimas de coagulante y floculante y se procedió con la mezcla rápida (100 rpm durante 1 minuto). Luego de transcurrido el tiempo de mezcla rápida, se programó el equipo para comenzar la mezcla lenta con el gradiente seleccionado para la prueba.

Los gradientes utilizados para la realización de las pruebas fueron seleccionados utilizando la Figura 3.

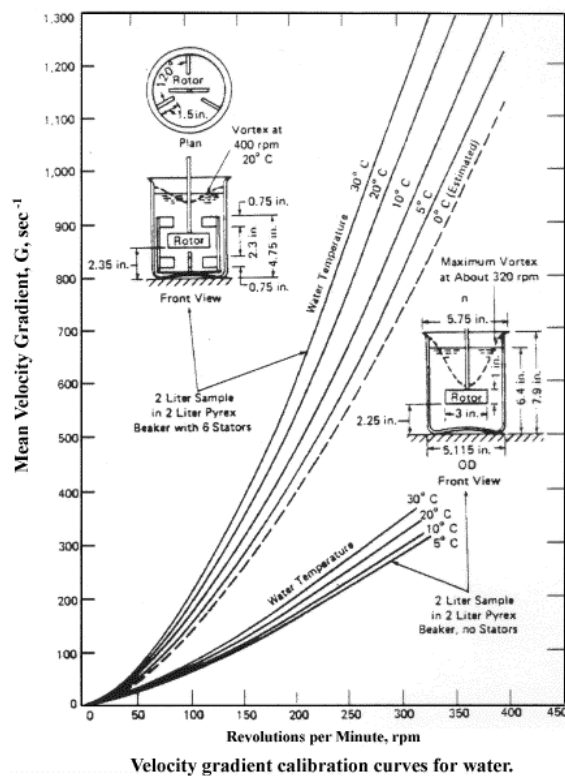


Figura 3. Curvas de gradiente de velocidad, según la temperatura del agua y las rpm utilizadas.

Tomado de (Ahumada Theoduloz, 2011)

En total se realizaron 4 pruebas con gradientes diferentes, los cuales se encuentran especificados en la Tabla 6, y se siguió la secuencia descrita en la Tabla 7 repitiéndola en cada una de las pruebas.

Tabla 6.

Pruebas de gradiente óptimo

Pruebas de gradiente		
N° de prueba	Velocidad de agitación (rpm)	Gradiente utilizado (s^{-1})
1	20	5
2	30	10
3	40	20
4	50	30

Tabla 7.

Secuencia para determinación de gradiente y tiempo óptimos

Tiempo (minutos)	Acción realizada
0	Comenzó la floculación al gradiente seleccionado
7	Se levantó el agitador de la jarra 1
13	Se levantó el agitador de la jarra 2
17	Se tomó la muestra de la jarra 1 y se midió la turbidez y color
20	Se levantó el agitador de la jarra 3
23	Se tomó la muestra de la jarra 2 y se midió la turbidez y el color
30	Se tomó la muestra de la jarra 3 y se midió la turbidez y color
40	Se levantó el agitador de la jarra 4
50	Se tomó la muestra de la jarra 4 y se midió la turbidez y color

3.1.2. Cálculos

Todos los cálculos realizados para el diseño del sistema propuesto en este estudio, se llevaron a cabo teniendo como base de referencia el libro MWH's Water Treatment – Principals and Design, 3d Edition, Cap. 9 (Crittenden et al., 2012).

Adicionalmente, se debe mencionar que se utilizó el software Mathcad para la realización de cada uno de los cálculos necesarios. Dentro del programa, se introdujeron todos los datos y variables fundamentales para que se ejecuten las ecuaciones a las que estas corresponden, de modo que se facilitó su resolución, se redujo los tiempos de cálculo y se logró una presentación ordenada dentro de cada archivo creado.

a) Dimensionamiento de tanques

Los cálculos realizados para lograr el dimensionamiento del tanque de mezcla lenta, se llevaron a cabo usando las Ecuaciones 1 y 2 detalladas en los acápites 2.5.1.3 y 2.5.1.4 (Marco teórico); mientras que para el dimensionamiento de los tanques floculadores, se tomó en cuenta las limitaciones por espacio, presupuesto y material.

b) Volumen de flóculos

Este volumen fue determinado utilizando la Ecuación 3 descrita en el acápite 2.5.2.2 (Capítulo II), de modo que se logró una percepción del volumen total de flóculos que estuvieron presentes en el agua, una vez ocurrida la floculación, además este cálculo influye para la determinación del tiempo medio de floculación.

c) Tiempo medio de floculación

Para el cálculo de este tiempo se definieron algunas variables que deben tenerse en cuenta dentro de la fórmula utilizada para determinarlo, como el volumen de flóculos.

La Ecuación 4 detallada en el acápite 2.5.2.3 (Marco teórico), misma que describe como se obtuvo el tiempo medio de floculación y los datos que intervinieron en su cálculo.

d) Tamaño de la partícula fractal

Para este cálculo se utilizaron las Ecuaciones 5 y 6 descritas en el acápite 2.5.2.4 (Marco teórico), las cuales describen el volumen y diámetro del agregado.

e) Dimensionamiento de propellers

Dentro de los cálculos realizados existen variables que se deben tomar en cuenta, mismas que se encuentran descritas en la Tabla 1 del acápite 2.5.3 (Capítulo II). Además, dado que las dimensiones de una turbina dependen de varios otros factores, las Ecuaciones empleadas fueron las 7, 8 y 9 descritas en el acápite 2.5.3.1 (Marco teórico) para llegar a conocer el diámetro adecuado que deberían presentar dichas turbinas. Adicionalmente, para la longitud que presentaron las turbinas giratorias, se tomó en cuenta los criterios descritos dentro del libro MWH's Water Treatment – Principals and Design, de modo que se aseguró el dimensionamiento óptimo para que el sistema funcione correctamente.

f) Presiones ejercidas en el interior del tanque

Las presiones que ejerce el agua dentro de cada tanque y a diferentes alturas, fueron calculadas con la utilización de la Ecuación 10, detallada en el acápite 2.5.4 (Capítulo II), conociendo que usualmente las alturas de presión son cada $\frac{H}{3}$, de modo que para la determinación de cada presión ejercida, se tomó en cuenta cada altura parcial encontrada según el principio antes mencionado.

3.2. Construcción del sistema

3.2.1. Construcción de tanques

Para cada uno de los tanques a construirse se utilizó acrílico de 9 mm de espesor, el cual fue cortado con la ayuda de una cortadora láser, siguiendo el diseño realizado en el programa AutoCad (2016) de las piezas que conformarían cada tanque.

Las dimensiones totales de las planchas de acrílico utilizadas fueron de 1.20 m de alto x 1.80 m de ancho. En total se utilizaron dos planchas completas y un

pequeño cuadrado para la obtención de todas las piezas a utilizarse en la construcción. Adicionalmente se debe mencionar que, dentro del diseño y para facilitar la construcción de los tanques, se dibujaron y cortaron dientes que sirvieron como juntas para la unión de las planchas de acrílico.

Una vez que se tuvieron todas las piezas cortadas, se procedió a la prueba de afianzamiento de las cuñas, en la que se determinó que existieron ligeros errores en los cortes y se debió esmerilar algunas de las mismas, para que se sujeten de manera adecuada a la base y se afirmó cada pieza con la ayuda de tornillos que unieron las paredes entre sí.

Por otro lado, el sellado se llevó a cabo con la aplicación de polvo de acrílico, obtenido al esmerilar el mismo, y cloruro de metilo que es líquido altamente volátil y tóxico, muy utilizado como solvente industrial, que actúa sobre el acrílico formando una especie de pasta gomosa al entrar en contacto con éste o con el polvo (INSST, 2018), luego de ello se lijaron los excesos que pudieran haber quedado de este procedimiento. Además, las esquinas dentro de los tanques fueron sobre selladas con la ayuda de silicona especial, la cual se adhiere con facilidad al acrílico y taponan los pequeños huecos que pudieron haber quedado expuestos.

Finalmente, se colocaron los tapones necesarios para las purgas en cada tanque y para las conexiones entre ellos, de modo que estén listos para la realización de las pruebas hidráulicas.

3.2.2. Construcción de estructuras de soporte y propellers

El material utilizado para la elaboración de las estructuras fue tool de 3 mm de espesor x 2 plg de ancho. Estas estructuras que dan soporte a cada uno de los tanques, fueron enviadas a ser construidas en un taller especializado en trabajos con acero, de manera que se aseguró que la estructura terminada presente alta calidad y precisión. Además, el diseño que se utilizó para la construcción de las

estructuras fue dibujado en el programa AutoCAD y dichos planos se los envió de manera impresa para que en el taller sigan el diseño establecido.

En cuanto a los propellers, el material utilizado fue aluminio galvanizado. La varilla de soporte es rígida con un diámetro de 0.75 plg y las aspas están formadas por láminas de 4 mm de espesor x 2 plg de ancho. Una vez más, el material fue enviado a un taller especializado para la conformación de los propellers. El diseño que se utilizó para la construcción de los propellers fue dibujado en el programa AutoCAD y luego dichos planos se los envió de manera impresa para que en el taller sigan el diseño establecido

3.2.3. Construcción del sistema electrónico propulsor

Para la determinación del motor más apto que se acople a los requerimientos que exige el sistema para su eficaz funcionamiento, se elaboró un prototipo electrónico de prueba que fue ensayado dentro del máximo volumen de agua que alberga cada tanque, comprobando que la capacidad del motor y la configuración dada al prototipo, logren impulsar sin dificultad el agua contenida. Es así que, para la conformación del sistema electrónico que impulsó las turbinas de mezcla dentro de los tanques, se utilizaron los materiales descritos en la Tabla 8.

Tabla 8.

Materiales para sistema electrónico propulsor

Materiales	Cantidad Requerida
Controlador de motor a pasos bipolar	2
Motor a pasos Nema 23	2
Motor a pasos Nema 17	1
Fuente de energía (12V/20A)	1
Fuente de energía (12V/5A)	1
Cable 22 AWG (para audio)	8 m

Cable para conexión eléctrica (110V)

1 m

Para ser ensamblados los sistemas electrónicos, se contó con el apoyo del personal capacitado de la Unidad de Innovación Tecnológica (UITEC) de la UDLA, ubicada en el segundo piso de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Aplicadas (FICA), por lo que, se logró conectar y conformar el sistema electrónico siguiendo las especificaciones y requerimientos necesarios para su adecuado funcionamiento.

Por otro lado, las piezas utilizadas (matrimonio) para la unión entre los ejes de los motores y cada propeller, fueron impresas de acuerdo a un diseño funcional realizado por un docente de la carrera de “Ingeniería en Producción Industrial” y con la ayuda de una impresora 3D.

3.3. Pruebas Hidráulicas del sistema

a) Pruebas de estanqueidad

La realización de estas pruebas se llevó a cabo en el laboratorio LQ5, en las cuales se colocó un nivel de agua medio dentro de los tanques, para comprobar la existencia de fugas en los mismos, principalmente en el tanque floculador, dichas fugas que fueron selladas de manera oportuna y eficiente, una vez que se drenó por completo el agua de interior del tanque.

b) Pruebas de funcionamiento

Para realizar las pruebas de funcionamiento del sistema, se preparó el volumen total de agua residual sintética que será contenida en ambos tanques, usando la misma fórmula descrita en la Tabla 2 (Capítulo III), que pasaría por las tres cámaras que comprenden los tanques, para su tratamiento. Una vez que el agua sintética llegó al volumen máximo dentro de los tanques, se inició el funcionamiento de las paletas giratorias, con el gradiente óptimo antes

determinado, dentro de cada tanque y se añadió de manera paulatina las dosis óptimas de coagulante y floculante en el tanque coagulador, iniciándose la reacción correspondiente y formándose los flóculos que sedimentaron en un sedimentador ya construido.

Una vez culminado el tiempo de floculación, se tomaron muestras del agua tratada a 5 cm de la superficie dentro del tanque de mezcla lenta, con la ayuda de pipetas y tubos de ensayo, para la medición de las características finales en cuanto a color, turbidez, pH y temperatura; además, se determinó el volumen aproximado de lodo producido en ml/l.

4. Capítulo IV. Resultados y Discusión

4.1. Diseño

4.1.1. Pruebas de jarras

Las características iniciales del agua sintética utilizada se describen en la Tabla 9.

Tabla 9.

Características iniciales del agua residual sintética

Características Iniciales	
pH	7.5
Color (Pt:Co)	417
Turbidez (NTU)	109.5
Temperatura (°C)	12

a) Dosis óptima de coagulante

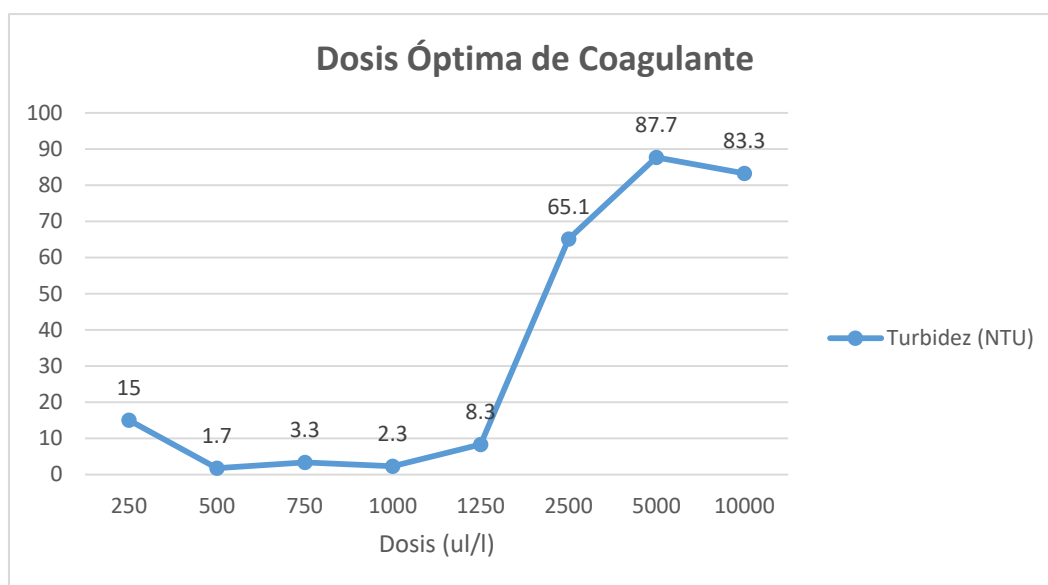


Figura 4. Valores de turbidez obtenidos de las pruebas para la determinación de dosis óptima de coagulante.

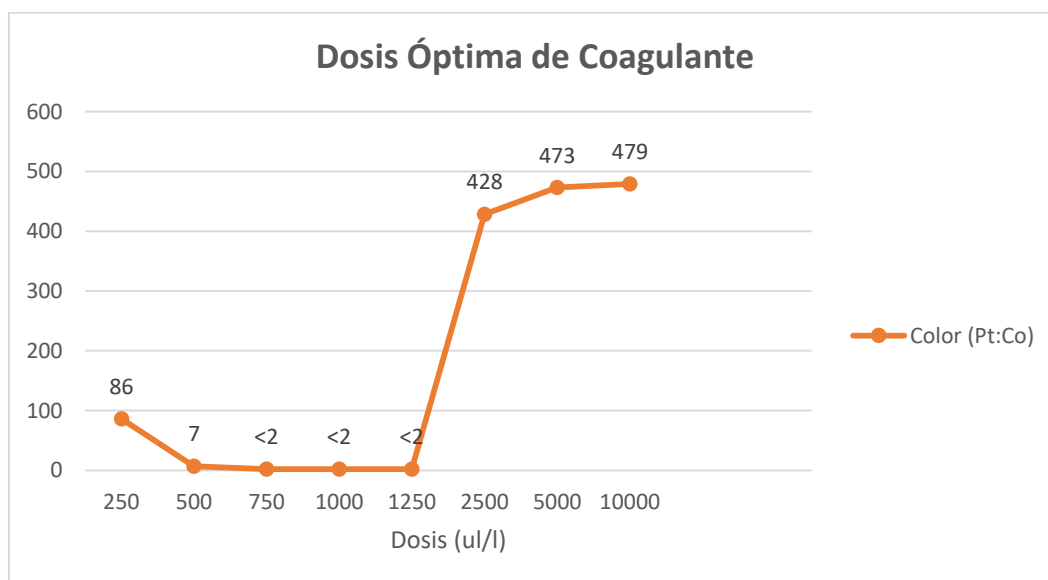


Figura 5. Valores de color obtenidos de las pruebas para la determinación de dosis óptima de coagulante.

Se puede observar que, a mayor dosis añadida del coagulante, se produce una mayor turbidez en el agua. Según los valores de turbidez obtenidos y la influencia del color en el agua para estos valores, se determinó que la dosis óptima de

coagulante era de 500 ul/l con un valor de color de 7 en la escala de Platino: Cobalto (Pt: Co).

b) Dosis óptima de floculante

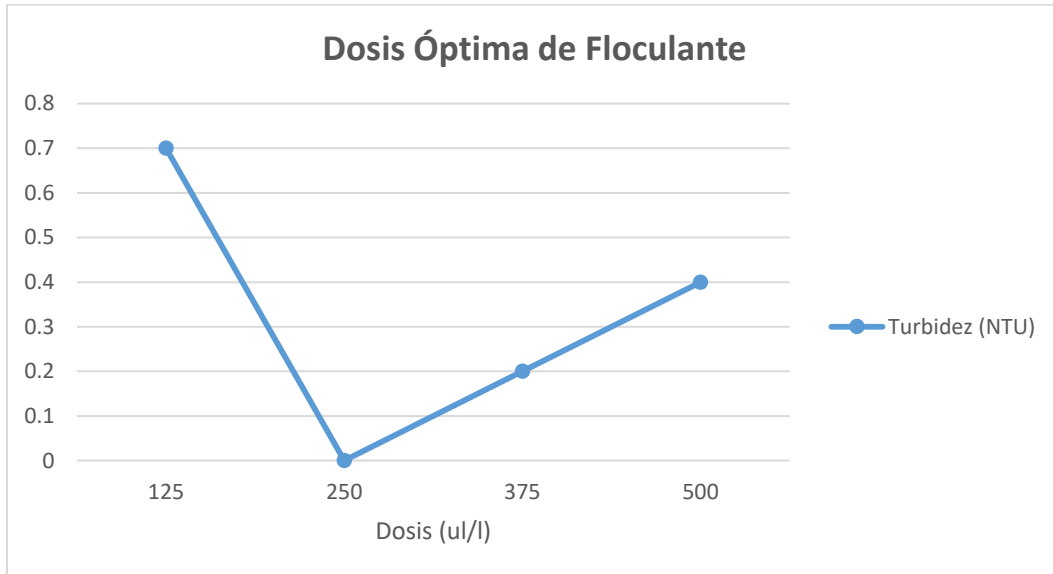


Figura 6. Valores de turbidez obtenidos de las pruebas para la determinación de dosis óptima de floculante.

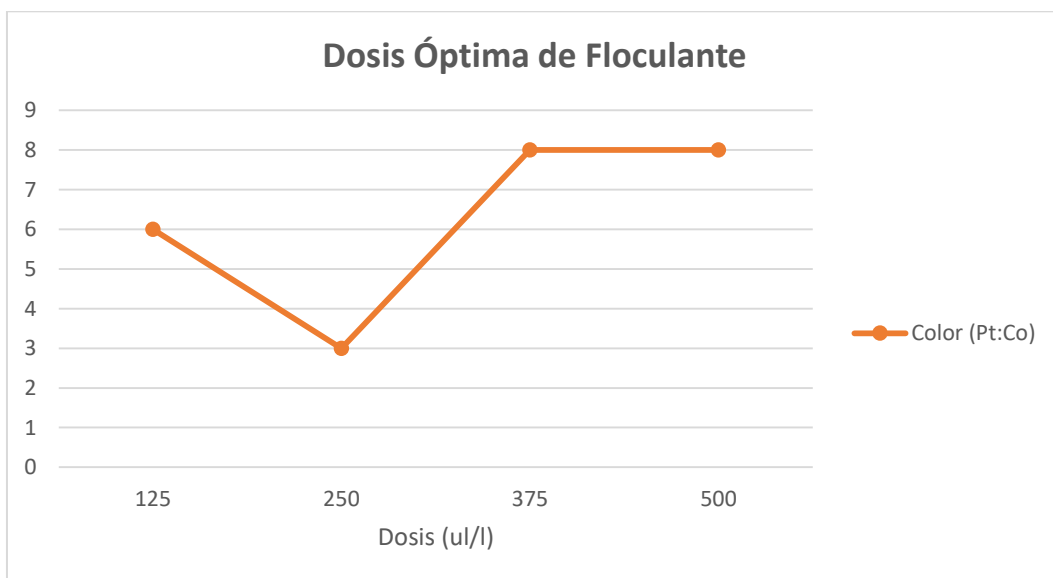


Figura 7. Valores de color obtenidos de las pruebas para la determinación de dosis óptima de floculante.

Se observó que los valores de turbidez no son tan distantes entre sí. Sin embargo, al obtener que el mejor dato fue de 0 NTU, se determinó que la dosis añadida de floculante de 250 ul/l es la más óptima para el tratamiento del agua, además de que el valor de color fue de 3 en esta dosis, siendo este el más bajo observado, lo cual demostró que existe una estrecha relación entre estos dos factores, dada la eliminación total de la turbidez en el agua y la reducción muy notoria de color.

c) pH óptimo

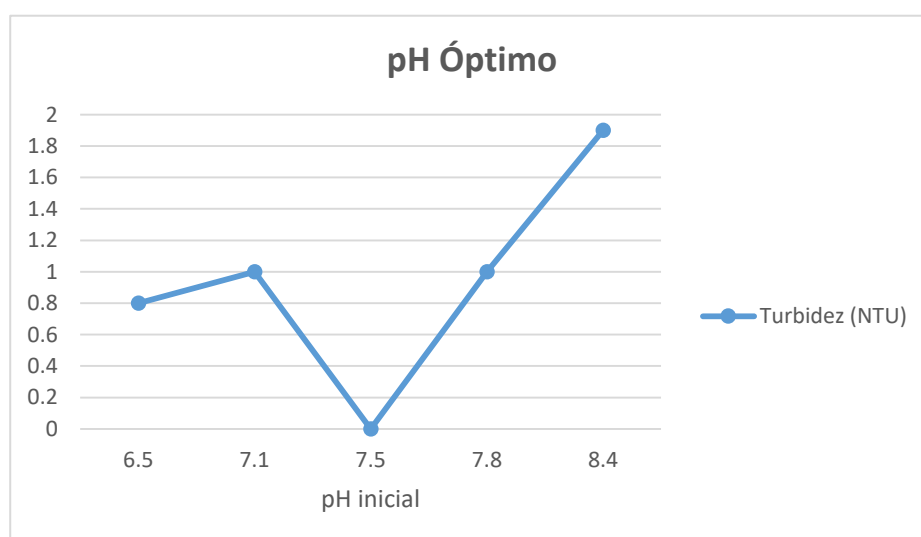


Figura 8. Valores de turbidez obtenidos en las pruebas al variar el pH del agua.

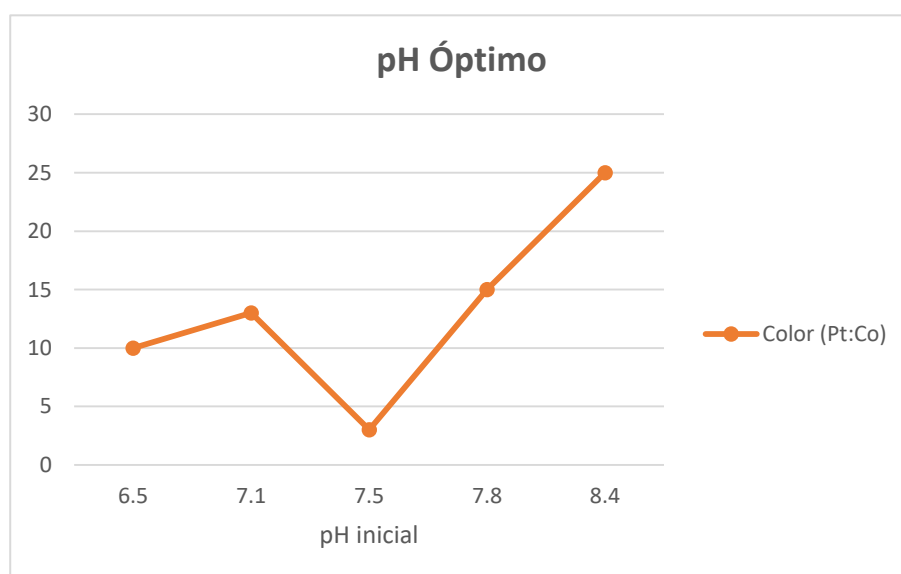


Figura 9. Valores de color obtenidos en las pruebas al variar el pH del agua.

Dados los resultados obtenidos en los valores finales de turbidez y color, se determinó que el pH del agua no necesita ser variado, debido a que notoriamente los datos recolectados para la gráfica muestran un incremento razonable en los valores de turbidez al variar el pH, que por ende representan un aumento en el color del agua tratada como se evidencia en la Figura 9.

d) Gradiente y tiempo óptimos

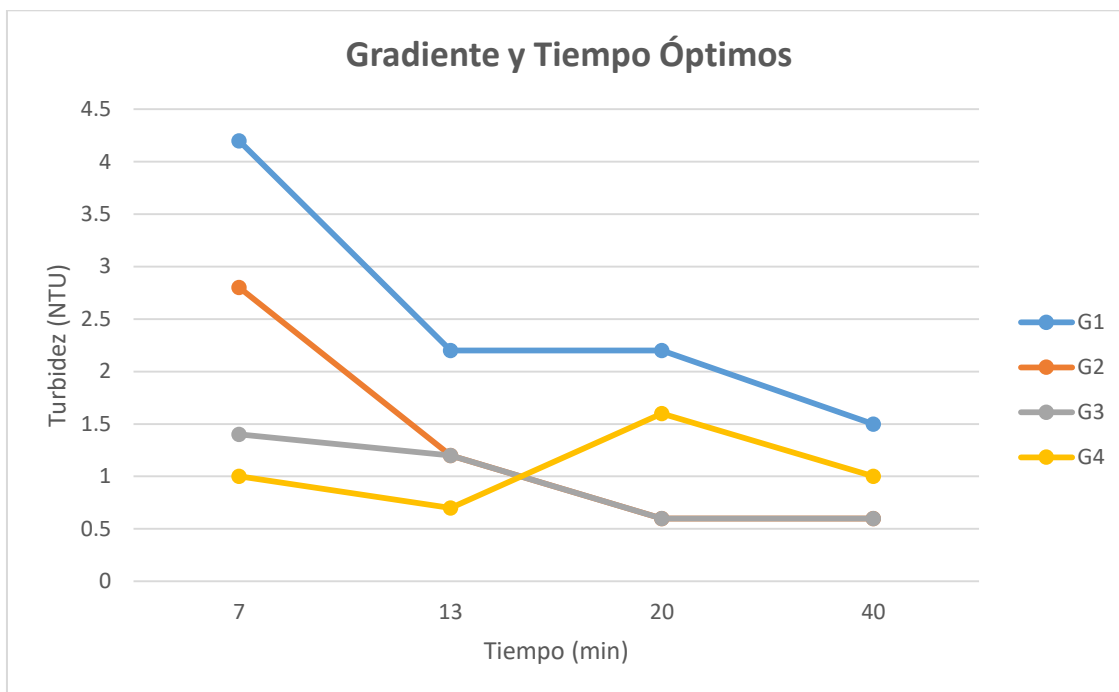


Figura 10. Valores de turbidez obtenidos en las pruebas para la determinación de gradiente y tiempo óptimos.

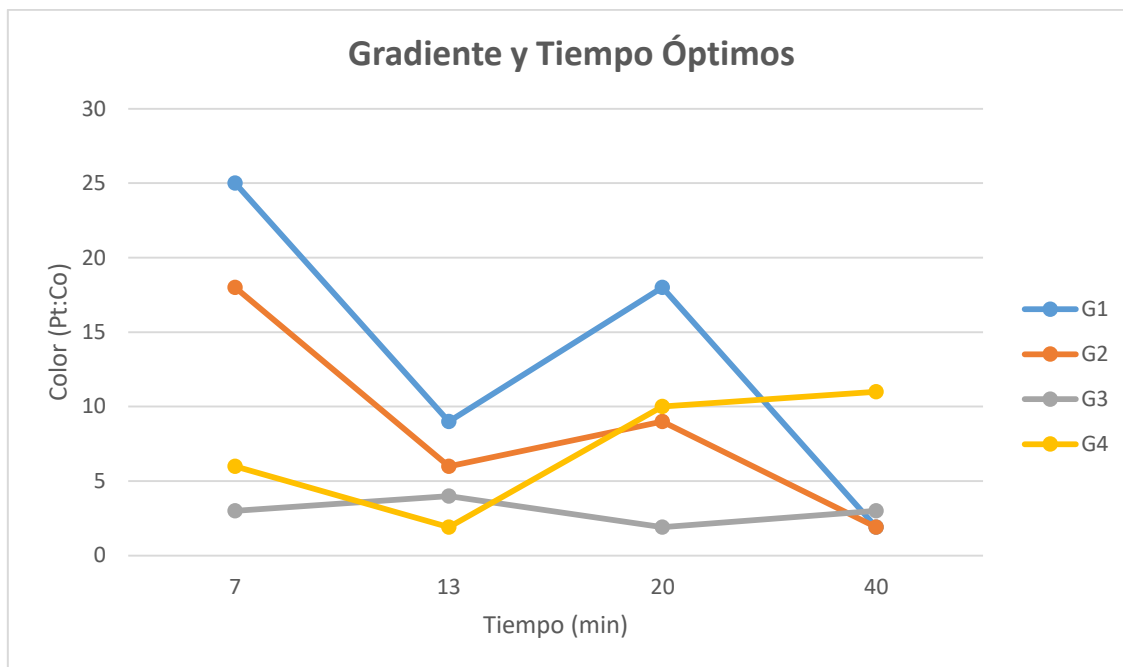


Figura 11. Valores de color obtenidos en las pruebas para la determinación de gradiente y pH óptimos.

Siguiendo lo observado en la Figuras 10 y 11, se determinó que el gradiente adecuado es el G3 ($20s^{-1}$) y un tiempo de 20 minutos para el proceso de floculación, dado que el valor de turbidez es de 0.6 NTU y el de color es <2 , lo que representa una reducción del 99.5% de ambos parámetros, utilizando el gradiente y tiempo mencionados. Sin embargo, cabe mencionar que a pesar de que el valor de turbidez antes mencionado se haya obtenido en el G2 también, la selección del gradiente 3 como el óptimo, se la realizó en base a que ambos parámetros (turbidez y color) sean los más bajos obtenidos.

4.1.2. Dimensionamiento de tanques

Los resultados obtenidos con la ayuda del software Mathcad y el uso de las ecuaciones 1 a 10, detalladas en el Capítulo II (Marco Teórico), se describen en las ecuaciones 11 a 36.

4.1.2.1. Tanque de mezcla rápida

$$Q := 40 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

$$T1 := 1 \text{min}$$

$$V1 := Q \cdot T1 = 40 \text{L}$$

(Ecuación 11)

$$L1 := \sqrt[3]{V1} = 0.342 \text{m}$$

(Ecuación 12)

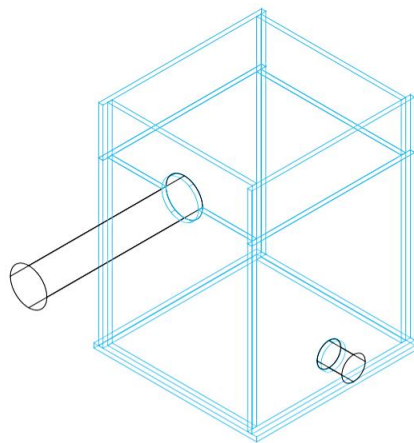


Figura 12. Dibujo del tanque de coagulación, realizado en el programa AutoCAD.

4.1.2.2. Tanque de mezcla lenta

La longitud del tanque floculador bicameral fue determinada sin cálculo alguno, solamente se tuvieron en cuenta las limitaciones existentes. Sin embargo, el volumen que contendrían los tanques si fue calculado usando una forma simple en relación a la longitud antes determinada.

$$L3 := 0.6r$$

$$V3 := 0.216 \text{m}^3$$

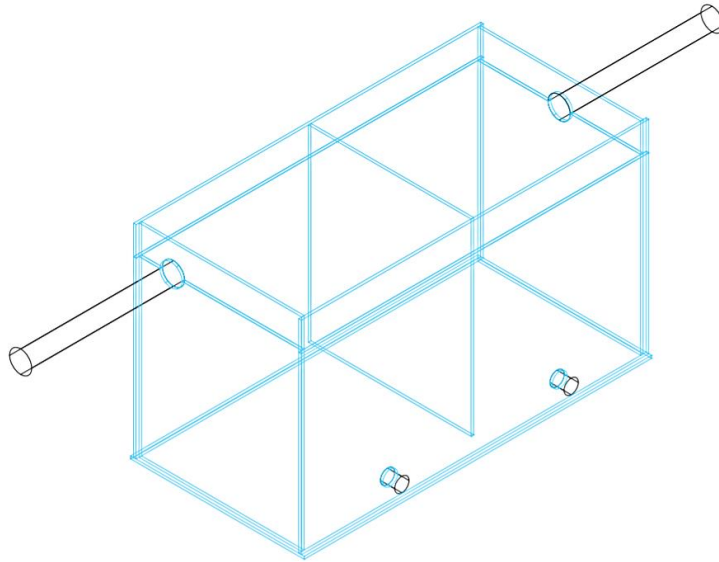


Figura 13. Dibujo del tanque de floculación, realizado en el programa AutoCAD.

4.1.3. Floculación

4.1.3.1. Volumen de flóculos

$$d_i := 10\mu\text{m}$$

$$\alpha := 1$$

$$\text{Gradiente} := \frac{20}{\text{s}}$$

$$n_i := \frac{10000}{\text{mL}}$$

$$\Omega := \frac{[\pi \cdot (d_i)^3 \cdot (n_i)]}{6} = 5.236 \times 10^{-6}$$

(Ecuación 13)

4.1.3.2. Tiempo medio de floculación

$$\text{tiempomedio} := \frac{(-\pi \cdot \ln(0.95))}{(4 \cdot 1 \cdot \Omega \cdot \text{Gradiente})} = 384.7 \text{ s}$$

(Ecuación 14)

4.1.3.3. Tamaño de la partícula fractal

$$N_{\text{departagreg}} := 100$$

$$\text{porosidad} := 0.4$$

$$\text{areadeesfera} := \frac{4}{3} \cdot \pi$$

$$\text{Volumendelagregado} := \left[\text{areadeesfera} \cdot (0.315 \mu\text{m})^3 \cdot \frac{N_{\text{departagreg}}}{\text{porosidad}} \right] = 3.273\text{E-}014\text{L}$$

(Ecuación 15)

$$d_a := 2 \cdot \left(\frac{3}{4\pi} \cdot \text{Volumendelagregado} \right)^{\frac{1}{3}} = 3.969 \times 10^{-6} \text{ m}$$

(Ecuación 16)

4.1.4. Dimensionamiento de propellers

4.1.4.1. Longitud de propellers

Dado que la sugerencia en bibliografía es que la longitud total del propeller sea igual a $\frac{2}{3}$ de la altura total interna de cada tanque, se calculó la medida exacta de esta altura para determinar la longitud de cada propeller diseñado.

a) Tanque coagulador

$$h_{\text{total}} := 0.34r$$

$$h_{\text{parciales}} := \frac{h_{\text{total}}}{3} = 0.113 \text{ m}$$

(Ecuación 17)

$$h_{c1} := h_{\text{parciales}} \cdot 1 = 0.113 \text{ m}$$

(Ecuación 18)

$$h_{c2} := h_{\text{parciales}} \cdot 2 = 0.227 \text{ m}$$

(Ecuación 19)

b) Tanque floculador

$$h_{total1} := 0.6r$$

$$h_{parciales1} := \frac{h_{total1}}{3} = 0.2 \text{ m}$$

(Ecuación 20)

$$h1 := h_{parciales1} \cdot 1 = 0.2 \text{ m}$$

(Ecuación 21)

$$h2 := h_{parciales1} \cdot 2 = 0.4 \text{ m}$$

(Ecuación 22)

4.1.4.2. Diámetro de propellers

a) Tanque coagulador

$$A_{plan} := (0.342 \text{ m})^2 = 0.117 \text{ m}^2$$

(Ecuación 23)

$$Te1 := \sqrt{\frac{4 \cdot A_{plan}}{\pi}} = 0.386 \text{ m}$$

(Ecuación 24)

$$D1 := Te1 \cdot 0.45 = 0.17 \text{ m}$$

(Ecuación 25)

b) Tanque floculador

$$A_{plan2} := L3^2 = 0.36 \text{ m}^2$$

(Ecuación 26)

$$Te2 := \sqrt{\frac{A_{plan2} \cdot 4}{\pi}} = 0.677 \text{ m}$$

(Ecuación 27)

$$D3 := 0.45 \cdot Te2 = 0.3 \text{ m}$$

(Ecuación 28)

4.1.5. Presiones ejercidas en el interior del tanque

a) Tanque coagulador

$$\rho := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$h_{\text{total}} := 0.34r$$

$$h_{\text{parciales}} := \frac{h_{\text{total}}}{3} = 0.113 \text{ m}$$

$$h_{c1} := h_{\text{parciales}} \cdot 1 = 0.113 \text{ m}$$

$$h_{c2} := h_{\text{parciales}} \cdot 2 = 0.227 \text{ m}$$

$$h_{c3} := h_{\text{total}} = 0.34 \text{ m}$$

(Ecuación 29)

$$g = 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$p_{c1} := \rho \cdot g \cdot h_{c1} = 1.111 \times 10^3 \text{ Pa}$$

(Ecuación 30)

$$p_{c2} := \rho \cdot g \cdot h_{c2} = 2.223 \times 10^3 \text{ Pa}$$

(Ecuación 31)

$$p_{c3} := \rho \cdot g \cdot h_{c3} = 3.334 \times 10^3 \text{ Pa}$$

(Ecuación 32)

b) Tanque floculador

$$\rho := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$h_{\text{total1}} := 0.6r$$

$$h_{\text{parciales1}} := \frac{h_{\text{total1}}}{3} = 0.2 \text{ m}$$

$$h_1 := h_{\text{parciales1}} \cdot 1 = 0.2 \text{ m}$$

$$h_2 := h_{\text{parciales1}} \cdot 2 = 0.4 \text{ m}$$

$$h_3 := h_{\text{total}} = 0.6\text{m}$$

(Ecuación 33)

$$g = 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$p_1 := \rho \cdot g \cdot h_1 = 1.961 \times 10^3 \text{ Pa}$$

(Ecuación 34)

$$p_2 := \rho \cdot g \cdot h_2 = 3.923 \times 10^3 \text{ Pa}$$

(Ecuación 35)

$$p_3 := \rho \cdot g \cdot h_3 = 5.884 \times 10^3 \text{ Pa}$$

(Ecuación 36)

4.2. Construcción del sistema

4.2.1. Construcción de tanques

En los siguientes apartados, se presenta la memoria fotográfica que describe en secuencia la construcción de cada uno de los tanques, observándose a detalle el proceso realizado.

a) Tanque coagulador



Figura 14. Fotografía del proceso de construcción del tanque coagulador.



Figura 15. Fotografía de la finalización de construcción del tanque coagulador.

b) Tanque floculador



Figura 16. Fotografía del proceso de construcción del tanque floculador.



Figura 17. Fotografía de la finalización de construcción del tanque floculador.

4.2.2. Construcción de estructuras de soporte

Las Figuras 18 a 23, representan el diseño utilizado para la creación de planos y posterior construcción de las estructuras que dan soporte al sistema.

a) Tanque coagulador

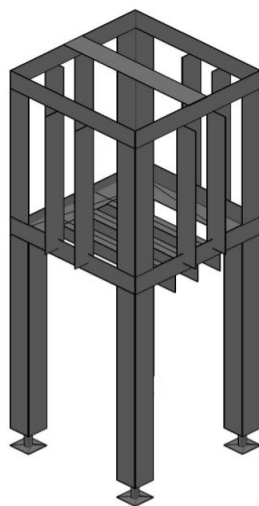


Figura 18. Dibujo de la estructura de soporte para el tanque de coagulación, realizado en el software AutoCAD.



Figura 19. Fotografía de la construcción de la base de soporte para el tanque coagulador.



Figura 20. Fotografía de la finalización de la estructura de soporte para el tanque coagulador.

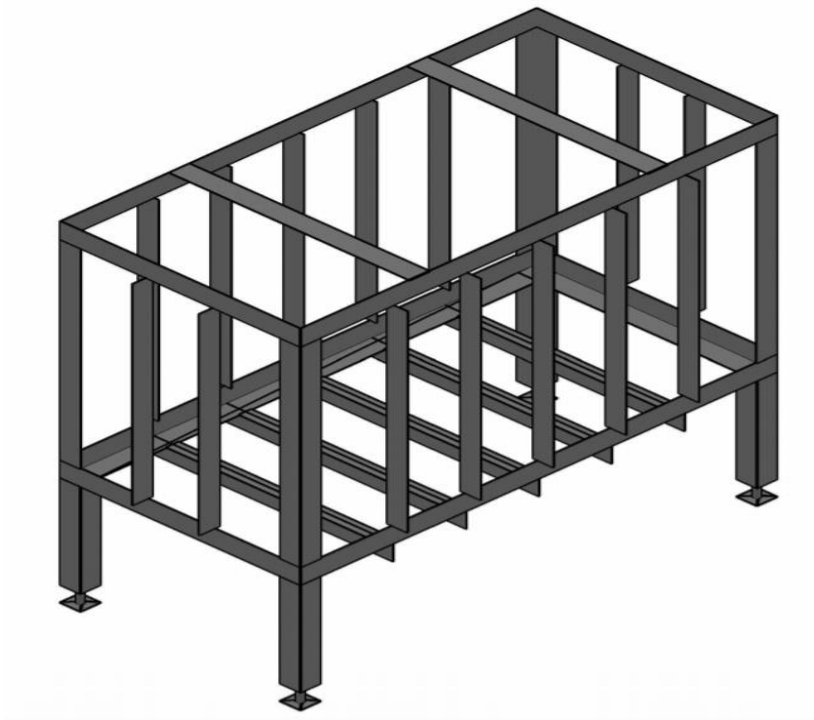
b) Tanque floculador

Figura 21. Dibujo de la estructura de soporte para el tanque de floculación, realizado en el software AutoCAD.



Figura 22. Fotografía de la construcción de la base de soporte para los tanques floculadores.



Figura 23. Fotografía de la construcción de la parte superior de soporte para los tanques floculadores.

4.2.3. Propellers

En cuanto a las paletas giratorias, el diseño elegido y su presentación final se describen en las Figura 24 a 27.

a) Tanque coagulador

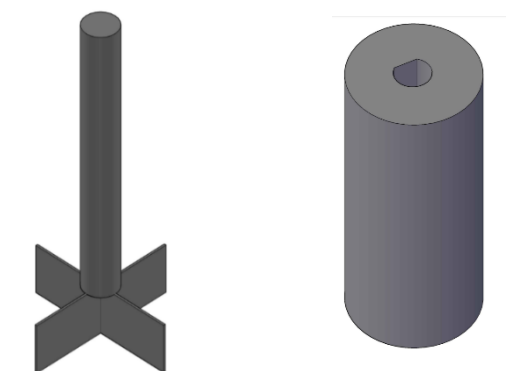


Figura 24. Dibujo del propeller y matrimonio, para el tanque de coagulación, realizado en el software AutoCAD.



Figura 25. Fotografía del propeller y matrimonio, para el tanque de coagulación.

b) Tanque floculador

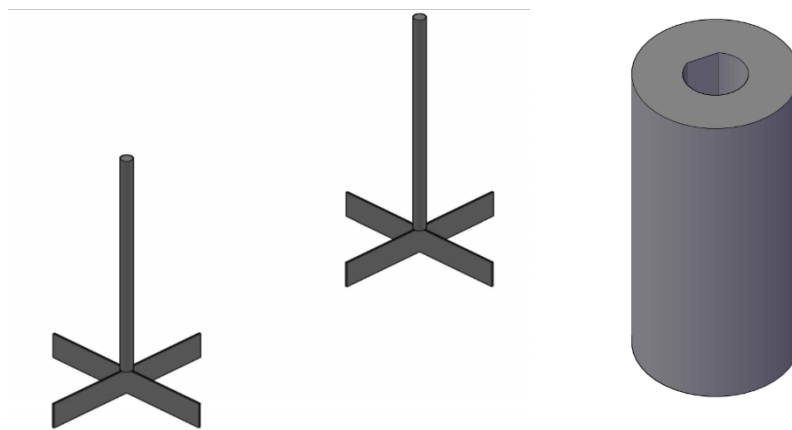


Figura 26. Dibujo de los propellers y matrimonio, para el tanque de floculación bicameral, realizado en el software AutoCAD.



Figura 27. Fotografía de los propellers y matrimonios, para el tanque de floculación.

4.3. Pruebas hidráulicas del sistema

En los siguientes apartados se presenta la memoria fotográfica de la realización de las pruebas de estanqueidad y funcionamiento, que se realizaron en el sistema diseñado y construido.

4.3.1. Pruebas de Estanqueidad

a) Tanque coagulador

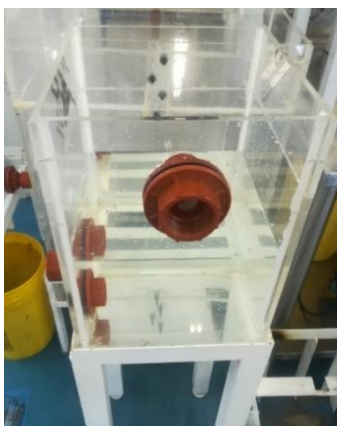


Figura 25. Fotografía de la prueba de estanqueidad del tanque coagulador.

b) Tanque floculador



Figura 26. Fotografía de la primera prueba de estanqueidad de los tanques floculadores.

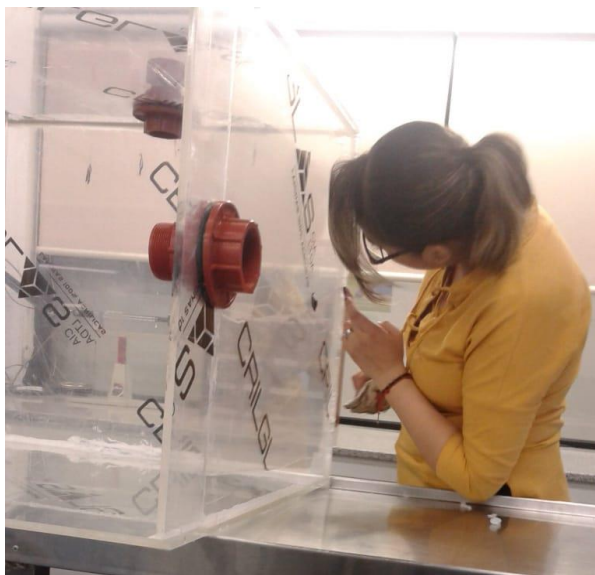


Figura 27. Fotografía del resellado del tanque floculador.



Figura 28. Fotografía de la prueba final del tanque floculador.

4.3.2. Pruebas de funcionamiento

Los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento, en cuanto a las características iniciales y finales del agua residual sintética, se muestran en las Tabla 10 y Tabla 11, respectivamente.

Tabla 10.

Características iniciales del agua residual sintética utilizada en las pruebas

Características iniciales	
pH	7.5
Turbidez (NTU)	117.1
Color (Pt: Co)	492
Temperatura (°C)	11.7

Tabla 11.

Características finales del agua residual sintética utilizada en las pruebas

Características finales		
Característica	Cámara de Floculación 1	Cámara de Floculación 2
pH	7.15	7.13
Turbidez (NTU)	8	10.2
Color (Pt: Co)	19	31
Temperatura (°C)	11.5	11.6

De acuerdo a lo descrito en las Tablas 10 y 11, se pudo definir que si existió una reducción de contaminantes del agua en relación a los cambios vistos en la turbidez y el color, es así que, se logró una reducción del 93.2% en la cámara de floculación 1 y del 91.3% en la cámara de floculación 2 en cuanto a turbidez; y, en cuanto al color, del 96.1% en la cámara de floculación 1 y del 93.7% en la cámara de floculación 2. Adicionalmente, se consiguió calcular el volumen aproximado de lodo que se produciría una vez terminado el proceso, dichos datos se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12.

Volumen aproximado de lodo producido medido en (ml/l)

Volumen de lodo (ml/l)	
Cámara de floculación 1	113
Cámara de floculación 2	156

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

El diseño del sistema de coagulación – floculación se lo realizó siguiendo bases y criterios de ingeniería, que son comúnmente utilizados en proyectos de construcción de obras de tratamiento de aguas residuales a nivel industrial, tomando en cuenta que dichos factores fueron adaptados de acuerdo a la escala en la que se construyó el modelo experimental, el tipo de material utilizado para la construcción y el tiempo de uso al que va a ser sometido.

En cuanto a las dimensiones del tanque coagulador (0.34 m x 0.34 m x 0.34 m) y del tanque floculador bicameral (1.2 m x 0.6 m x 0.6 m) y la cantidad de los materiales utilizados para la construcción del prototipo del sistema, hubo que tomar en cuenta las restricciones en cuanto a espacio y costo. Sin embargo, no se presentaron problemas mayores debido a las limitaciones mencionadas, por lo que el modelo construido fue el adecuado para el tratamiento de un volumen total de 0.397 m³ y su costo fue de 900 USD aproximadamente.

El caudal utilizado de 40 l/min y que se determinó mediante lo estudiado en trabajos anteriores, fue un factor clave para el cálculo de ciertas variables que se tomaron en cuenta para el diseño del modelo experimental, ayudó a la facilidad en el manejo de los procesos del sistema y presentó las condiciones óptimas para que el tratamiento se realice en el tiempo previsto (tiempo de residencia) y de manera eficaz.

Las pruebas de jarras realizadas previo al diseño del sistema, contribuyeron con la determinación de parámetros importantes que influyeron dentro de los cálculos efectuados para el dimensionamiento del sistema, dando como resultado que las cantidades de los componentes químicos, gradiente y tiempo de residencia fueron claves en la ejecución de los procesos, principalmente en lograr un volumen y tamaño adecuado de flóculos y en la remoción alcanzada, es así que, se puede mencionar que las relaciones que existen entre las remociones

obtenidas en las pruebas de jarras y el sistema diseñado son 1:0.94 y 1:0.97 en la cámara de floculación 1; y, 1:0.92 y 1:0.94 en la cámara de floculación 2.

5.2. Recomendaciones

Es recomendable que para futuros diseños, se tomen en cuenta las dificultades encontradas durante la construcción y sellado del modelo experimental, dado que el acrílico utilizado, a pesar de presentar grandes propiedades de resistencia y durabilidad, es muy propenso a mostrar pandeamientos debido a la presión que el agua ejerce en el interior, y por ende, se manifiestan fugas que se producen al ocurrir la separación de las paredes selladas.

Se propone, además, que se evalúe el uso prolongado del sistema, dado que el funcionamiento continuo podría presentar ciertos inconvenientes, principalmente en el sistema electrónico adaptado por sobrecalentamiento o por variaciones en el voltaje utilizado.

REFERENCIAS

- Ahumada Theoduloz, G. (2011). Tratamiento de agua potable: Coagulación, p. 11. Recuperado el 26 de Mayo de 2019 de https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/1/CI51K/1/material_docente/bajar?id_material=370694
- Alianza por el Agua. (2008). Manual de depuración de aguas residuales urbanas. *Centa*, pp. 1–264. <https://doi.org/Z-2802/08>
- Andía Cárdenas, Y. (2000). Tratamiento de agua coagulación y floculación. Recuperado el 20 de Marzo de 2049 de http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154
- Carrión Cruz, D. A. (2016). Tratamiento de aguas residuales y su influencia en el derecho a un ambiente sano de los ciudadanos que habitan en el entorno del Río Machángara al sur del Distrito Metropolitano de Quito en el año 2014. Recuperado el 25 de Marzo de 2019 de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/5770/1/T-UCE-0013-Ab-029.pdf>
- Chamorro, G. K. (2013). Evaluación de una planta de tratamiento de aguas residuales de una empresa de fabricación de queso. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Crittenden, J., Rhodes, R., Hand, D., Howe, K., & Tchobanoglous, G. (2012). *Coagulation and flocculation in Basic Water Treatment* (3d Edition). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1680/bwtse.63341.061>
- Eaton A. y Franson M. (2012). *Standards Methods for de Examination of Water and Wastewater*. USA.
- Escobar, J. C. (2003). Tratamiento Primario Avanzado (TPA) de aguas residuales – diagramas de coagulación – floculación y variables operativas. Recuperado el 22 de Marzo de 2019 de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/puertorico29/escobar.pdf>
- Fierro, G. (2018). Elaboración de un modelo experimental de la fase preliminar

- de una planta de tratamiento de aguas residuales (tesis para la obtención de grado de Ingeniero Ambiental en Prevención y Remediación). Universidad de Las Américas. Quito - Ecuador.
- Gómez Puentes, N. A. (2005). Remoción de materia orgánica por coagulación - floculación Néstor. Recuperado el 29 de Abril de 2019 de http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154
- Gómez Zamora, M. (2015). Tratamiento de aguas residuales en empresas, 50–52. Recuperado el 20 de Mayo de 2019 de <https://www.researchgate.net/publication/28280562>
- INEN (1992). Código ecuatoriano de la construcción (C.E.C). Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes. Ecuador.
- INSST. (2018). Cloruro de Metileno, 1–10. Recuperado el 12 de Junio de 2019 de http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/MIGRAR_VARIAS/MIGRAR_LEP_VALORES_LIMITE/Doc_Toxicologica/114_en_adelante/DLEP_117_Cloruro_de_metileno_Año_2018.pdf
- Lorenzo Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *Revista ICIDCA*, XL(2), 10–17. Recuperado el 29 de Abril de 2019 de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120664002>
- Martín García, I., Betancort Rodríguez, J. R., Salas Rodríguez, J. J., Peñate Suárez, B., Pidre Bocado, J. R., y Sardón Martín, N. (2006). Guía sobre tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población Mejora de la calidad de los efluentes. Recuperado el 30 de Abril de 2019 de <https://www.cienciacanaria.es/files/Guia-sobre-tratamientos-de-aguas-residuales-urbanas-para-pequenos-nucleos-de-poblacion.pdf>
- Metcalf & Eddy, Inc (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. USA: McGraw-Hill.
- OEFA. (2014). Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales. Recuperado el 02 de Mayo de 2019 de https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827

- Ortiz-Oliveros y Flores-Espinosa. (2003). Separación de Materiales Oleosos en Aguas Residuales Radiactivas por Flotación- Cinética de Flotación, 1–10. Recuperado el 20 de Mayo de 2019 de <https://www.cienciacanaria.es/files/Guia-sobre-tratamientos-de-aguas-residuales-urbanas-para-pequenos-nucleos-de-poblacion.pdf>
- Pacheco, R. (2015). Biopercolación para la Remoción de materia orgánica de aguas residuales tipo domésticas. (tesis para la obtención de grado de Ingeniero Ambiental en Prevención y Remediación). Universidad de Las Américas. Quito - Ecuador.
- Rojas, R. (2002). Conferencia Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. Recuperado el 27 de Abril de 2019 de <http://files.control-ambiental5.webnode.com.co/200000093-9097e9190c/GESTION%20INTEGRAL%20DEL%20TRATAMIENTO%20AR.pdf>
- Rojas, S., y Torrado, D. (2007). Implementación de una unidad piloto de floculación lastrada para evaluar su comportamiento en el tratamiento de aguas residuales domésticas. Recuperado el 28 de Mayo de 2019 de <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/10185/14107/1/T41.07>
- Simar S.A. (2010). Policloruro de aluminio 18%, 1–10. Recuperado el 14 de Junio de 2019 de <http://www.ecosmep.com/cabecera/upload/fichas/7167.pdf>
- Suárez, J., Jácome, A., y Ures, P. (2014). Coagulación-Floculación Serie: Tratamientos Primarios. Recuperado el 12 Abril de 2019 de <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Coagulación-floculación.pdf/b59be3a9-558c-62c3-66e1-d89f82e3aae7>
- Valencia López, A. E. (2013). Diseño de un sistema de tratamiento para las aguas cabecera parroquial de San Luis – Provincia de Chimborazo. Recuperado el 25 de Abril de 2019 de <http://files.control-ambiental5.webnode.com.co/200000093-9097e9190c/GESTION%20INTEGRAL%20DEL%20TRATAMIENTO%20AR.pdf>
- UDLA. (17 de Marzo de 2016). UDLA PARTICIPA POR LA DISTINCIÓN

AMBIENTAL. Recuperado el 08 Abril de 2019 de <https://www.udla.edu.ec/2016/03/17/udla-participa-por-la-distincion-ambiental/>

ANEXOS

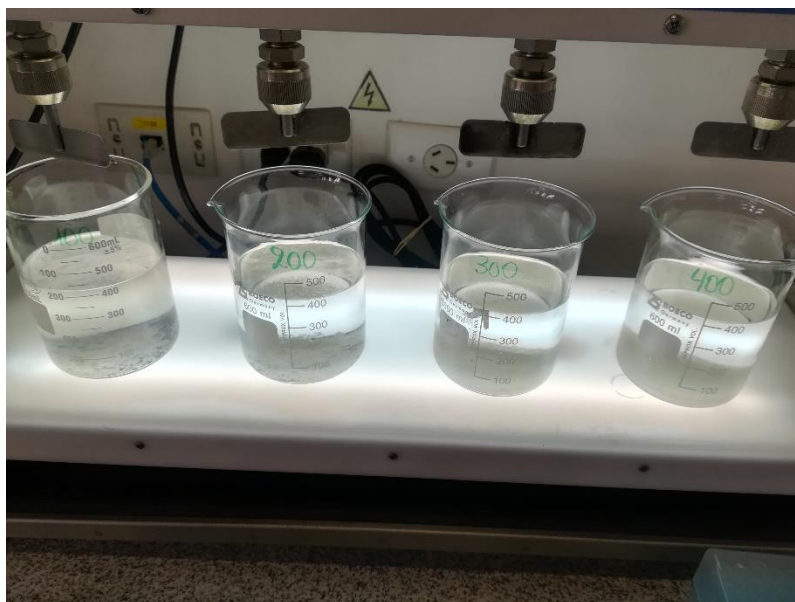
Anexo 1

Pruebas de jarras para determinación de dosis óptima de coagulante, con agua residual de tipo sintética



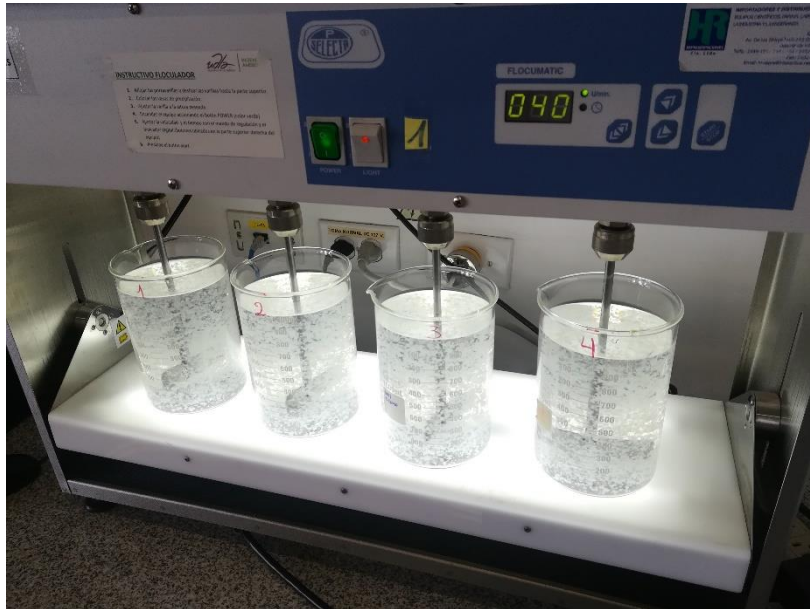
Anexo 2

Resultado de pruebas de jarras para determinación de dosis óptima de coagulante, con agua residual de tipo sintética



Anexo 3

Pruebas de jarras para determinación de gradiente y tiempo óptimos, con agua residual de tipo sintética



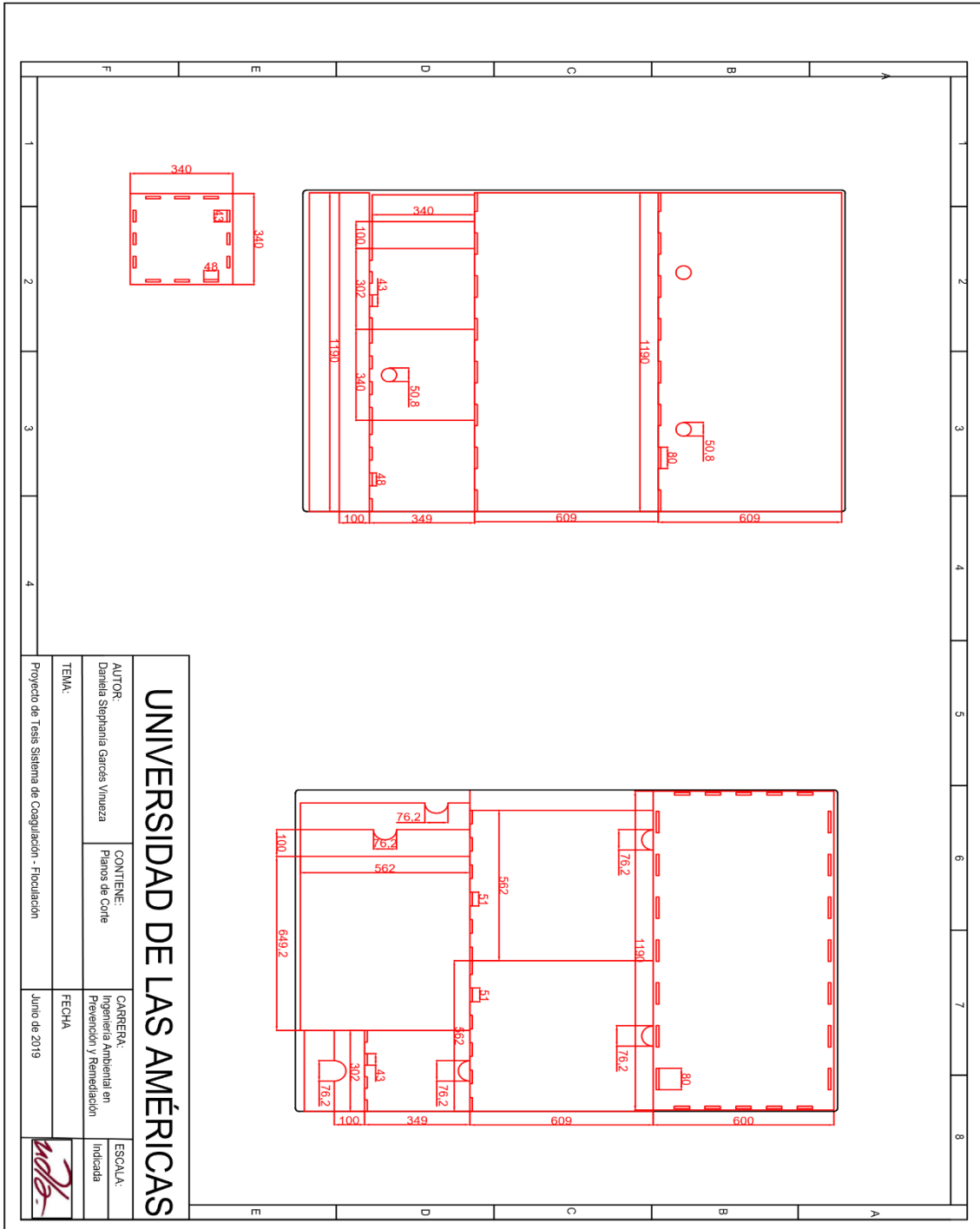
Anexo 4

Resultado de pruebas de jarras para determinación de gradiente y tiempo óptimos, con agua residual de tipo sintética



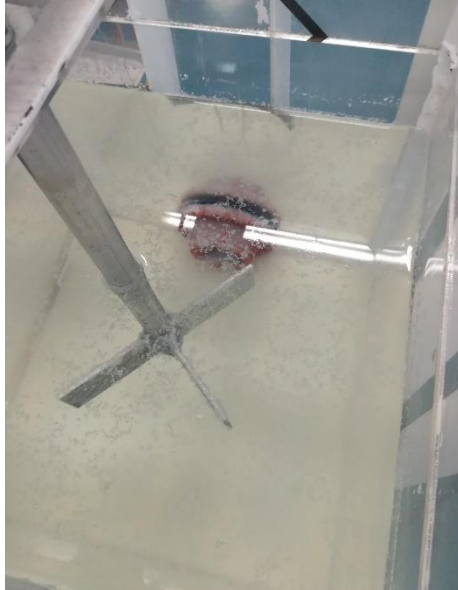
Anexo 5

Planos de corte de acrílico



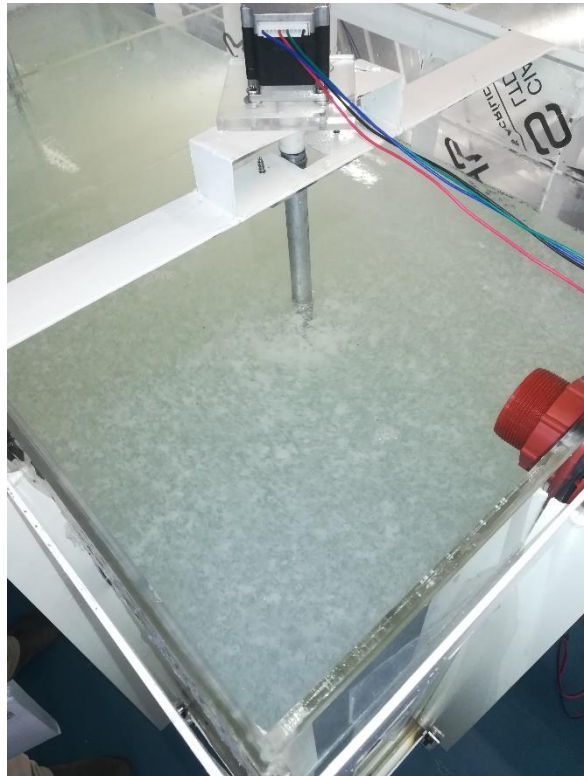
Anexo 6

Prueba de funcionamiento de sistema – Tanque coagulador



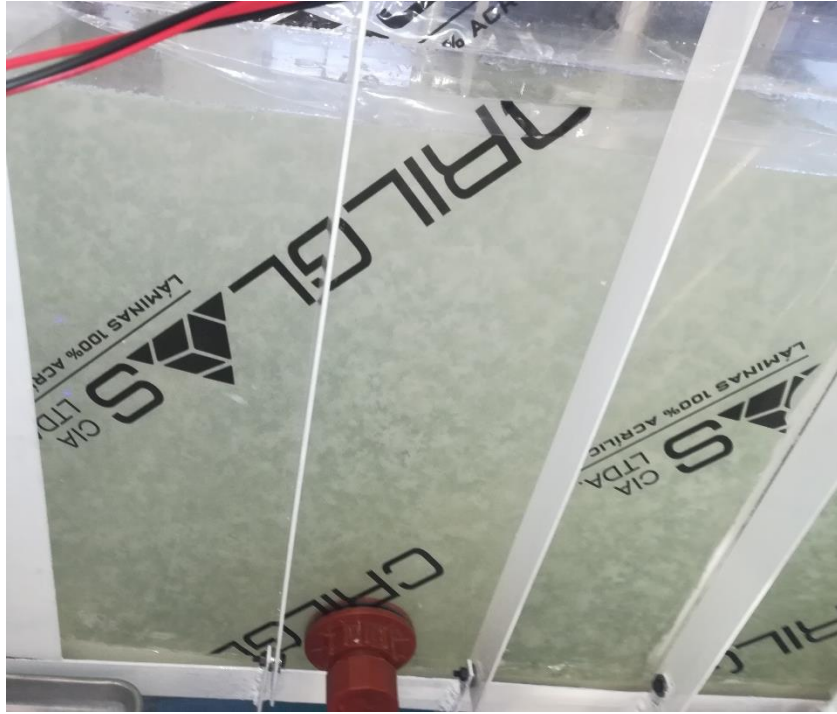
Anexo 7

Prueba de funcionamiento de sistema – Tanque floculador (cámara 1)



Anexo 8

Prueba de funcionamiento de sistema – Tanque floculador (cámara 2)



Anexo 9

Prueba de funcionamiento de sistema – Tanque floculador

