



Universidad De Concepción
Facultad de Ingeniería
Departamento de
Ingeniería Química



EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO DE UNIDADES DE FLOCULACIÓN/DECANTACIÓN MODULARES

IGNACIO ANÍBAL PÉREZ LINDNER

*Memoria de título presentada a la Facultad de Ingeniería de la
Universidad de Concepción para optar al título profesional de
Ingeniero Civil Químico*

Profesor Patrocinante:
Rodrigo Bórquez Y.

Profesor Comisión:
Andrés Mejía

Concepción, Enero 2023

Abstract

Water, an essential element for human life, generally needs treatment before being provided to the general population. Some of these treatments are coagulation, flocculation and sedimentation of suspended particles present in the water supply.

Throughout this study, the design parameters for compact equipment from the company Essbio, that carries out these processes and are built inside industrial 40 feet containers so it's easier to transport them, were calculated. These parameters were compared to values from existing facilities, obtained from an on-site visit to the potable water treatment plant in Hualqui, as well as ranges of values from bibliographical information.

According to the obtained results, it is possible to conclude that the equipment is incorrectly designed, which hinders the normal functioning of the plant where they are used by stopping their operation every few weeks to remove the sludge generated. For this reason, the equipment was redesigned.

For the process of coagulation, which was oversized in the compact equipment, it's preferable that it is carried out in a square tank of 1,1 x 1,1 x 1,2 meters, external to the container.

In order to being able to process a variable flow rate, a first design was suggested which features 2 flocculation chambers, each with a length of 3,4 meters, a sedimentation chamber with a length of 4 meters and PVC profiles which form square lamellas with dimensions of 5x5 centimeters and 60 centimeters of depth.

On the other hand, if the source of water presents low turbidity, it is advisable to increase the number of flocculation chambers, so as to have a bigger variance of the velocity gradient, which constrains the operative flow rate. The second design features 3 flocculation chambers, each with a length of 2,3 meters, keeping all the rest the same as the first design.

Resumen

El agua, que constituye un elemento esencial para la vida humana, generalmente necesita un tratamiento antes de poder ser suministrada a la población. Entre los procesos requeridos se encuentran la coagulación, la floculación y la sedimentación de partículas suspendidas que presenta el agua.

A lo largo de este estudio, se calcularon los parámetros de diseño de equipos compactos de la empresa Essbio que llevan a cabo estos procesos, los cuales se construyen dentro de contenedores industriales de 40 pies para poder ser fácilmente transportados. Estos parámetros se compararon tanto con valores de plantas existentes, elaborados a partir de una visita a terreno a la planta de Hualqui, como con rangos de valores conseguidos de información bibliográfica.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que el equipo se encuentra incorrectamente diseñado, lo cual entorpece el funcionamiento de la planta en la que se encuentran instalados actualmente ya que es necesario que se detenga su trabajo cada ciertas semanas a fin de retirar los lodos que se forman antes de tiempo. Debido a esto, se procedió a rediseñar los equipos.

Para la etapa de coagulación, la cual se encuentra sobredimensionada en los equipos compactos, es preferible que se efectúe en un estanque cuadrado de 1,1 x 1,1 x 1,2 metros externo al contenedor.

Con la finalidad de que los equipos sean capaces de procesar un caudal variable, se propone un primer diseño que consta de 2 cámaras de floculación, cada una de 3,4 metros de largo, una cámara de sedimentación laminar de 4 metros de largo con perfiles de PVC que forman lamelas cuadradas de 5x5 centímetros y una profundidad de 0,6 metros.

Por otra parte, si la fuente de agua presenta una turbiedad muy baja, es preferible aumentar la cantidad de cámaras de floculación para tener una variación más grande de gradiente de velocidad en estas secciones, lo cual restringe el caudal de operación. De aquí, el segundo diseño consta de 3 cámaras de floculación, cada una de 2,3 metros de largo, manteniéndose el resto igual.

Nomenclatura

Símbolo	Variable	Unidades
h	Altura del estanque	Metros
W_f	Ancho del floculador	Metros
W_p	Ancho de paletas	Metros
θ	Ángulo de inclinación de placas paralelas	Grados
A	Área superficial del sedimentador	m^2
A_b	Área transversal de boquillas	m^2
A_t	Área transversal del sedimentador	m^2
A_p	Área total de las paletas	m^2
CS	Carga superficial	$m/día$
Q	Caudal	m^3/s o L/s
C_a	Coefficiente de arrastre de paletas	Adimensional
K	Constante de agitador mecánico	Adimensional
C_f	Constante de pérdida de fricción	Adimensional
S_c	Constante de perfiles de sedimentador	Adimensional
ρ	Densidad	kg/m^3
D_b	Diámetro de boquillas	Metros
d	Diámetro del impulsor del agitador	Metros
D	Diámetro equivalente del estanque	Metros
ε	Eficiencia del motor del agitador	Adimensional
G	Gradiente de Velocidad	s^{-1}
L_p	Largo de paletas	Metros
l	Longitud de los perfiles	Metros
L	Longitud relativa del sedimentador	Adimensional
L'	Longitud relativa de la región de transición del sedimentador	Adimensional
L_c	Longitud relativa del sedimentador corregida en la longitud de transición	Adimensional

N_{RE}	Número de Reynolds	Adimensional
C	Porcentaje de sección transversal del floculador que ocupan las paletas	Adimensional
P	Potencia entregada al fluido	Watts
P_{eje}	Potencia en el eje de paletas	Watts
P_{real}	Potencia real del motor	Watts
h_f	Profundidad del floculador	Metros
R	Radio de giro de las paletas	Metros
e	Separación entre placas paralelas	Metros
t	Tiempo de residencia	Segundos o minutos
t_p	Tiempo de retención en placas paralelas	Minutos
N	Velocidad angular	Revoluciones por segundo
v_{sc}	Velocidad crítica de asentamiento	$m/día$
v_b	Velocidad del flujo a través de la boquilla	m/s
v_p	Velocidad de paletas	m/s
v_g	Velocidad de giro	m/s
v_h	Velocidad horizontal del fluido	m/s
v_o	Velocidad promedio del agua en sedimentador	$m/día$
ν	Viscosidad cinemática	m^2/s
μ	Viscosidad dinámica	$N \cdot s/m^2$
V	Volumen	m^3

Índice

1. Introducción	3
2. Objetivos	5
2.1. Objetivo general	5
2.2. Objetivos específicos	5
3. Marco Teórico	6
3.1. Tratamiento del agua potable	6
3.2. Coagulación	7
3.2.1. Teoría del proceso	7
3.2.2. Equipos para mezcla rápida	10
3.3. Floculación	11
3.3.1. Teoría del proceso	11
3.3.2. Equipos floculadores hidráulicos	12
3.3.3. Equipos floculadores mecánicos	13
3.4. Sedimentación	14
3.4.1. Teoría del proceso	14
3.4.2. Equipos sedimentadores	14
4. Metodología	18
4.1. Investigación Bibliográfica	18
4.2. Definición de Parámetros de Diseño	19
4.2.1. Coagulación y Floculación	19
4.2.2. Sedimentación	20
4.3. Visitas a Terreno	22
4.4. Metodología de Cálculo	29
4.4.1. Parámetros Coagulación y Floculación	29
4.4.2. Parámetros Sedimentación	30
4.5. Rango de Parámetros	32
4.6. Verificación de Parámetros	35
4.7. Diseño del flocodecantador compacto	36
5. Resultados y Discusiones	40
5.1. Verificación de Parámetros	40
5.1.1. Planta de Hualqui	40
5.1.2. Flocodecantador compacto	41

5.2. Diseño preliminar del equipo.....	44
5.3. Análisis de sensibilidad	46
5.3.1. Tipo de agitador.....	46
5.3.2. Diseño de lamelas	47
5.3.3. Dimensiones de las cámaras de procesos.....	50
5.4. Diseño final del flocodecantador	52
5.5. Mejoras adicionales del flocodecantador	57
6. Conclusiones	60
7. Referencias.....	62
Anexos	65
Anexo A – Visitas a terreno.....	65
A.1. Planta de Hualqui	65
A.2. Flocodecantadores.....	67
Anexo B – Memorias de cálculo.....	71
B.1. Parámetros de la planta de Hualqui	71
B.2. Parámetros de flocodecantadores existentes	76
B.3. Diseño preliminar del flocodecantador	78
B.4. Diseño final de los flocodecantadores.....	82
Anexo C – Análisis de Sensibilidad	86
C.1. Diseño de lamelas.....	86
C.2. Dimensiones de las cámaras de procesos.	89
Anexo D – Diseño final de los flocodecantadores compactos	92
Anexo E – Mejoras adicionales.....	94

Índice de tablas

Tabla 1. Rango de parámetros de coagulación.	33
Tabla 2. Rango de parámetros de floculación.....	33
Tabla 3. Rango de parámetros de sedimentación.	34
Tabla 4. Información obtenida en terreno de la planta de Hualqui.....	40
Tabla 5. Parámetros calculados para la planta de Hualqui.....	41
Tabla 6. Información de diseño de flocodecantadores compactos.	42
Tabla 7. Parámetros calculados para flocodecantadores compactos.....	42
Tabla 8. Resultados de diseño preliminar de flocodecantadores.....	45
Tabla 9. Diseño de sistema de floculación de paletas	47
Tabla 10. Resultados de análisis de la influencia del tipo de lamela en sedimentador.....	48
Tabla 11. Especificaciones del flocodecantador compacto con 2 cámaras de floculación.	53
Tabla 12. Especificaciones del flocodecantador compacto con 3 cámaras de floculación.	54
Tabla 13. Valores del parámetro K dependiendo del tipo de agitador mecánico (Romero, 1999).	72
Tabla 14. Valores del parámetro S_c (Romero, 1999).	74
Tabla 15. Resultados de cálculos de parámetros de la mezcla rápida en la planta de Hualqui.	75
Tabla 16. Resultados de cálculos de parámetros de floculación en la planta de Hualqui.	75
Tabla 17. Resultados de cálculos de parámetros de sedimentación en la planta de Hualqui.	76
Tabla 18. Resultados de cálculos de parámetros de coagulación y de floculación para los flocodecantadores compactos.....	77
Tabla 19. Resultados de cálculos de parámetros de sedimentación para los flocodecantadores compactos.....	77
Tabla 20. Resultados de cálculos de los parámetros de diseño preliminares para las cámaras de mezcla rápida y de floculación de los flocodecantadores.....	81

Tabla 21. Resultados de cálculos de los parámetros de diseño preliminares para la cámara de sedimentación de los floccodecantadores.	81
Tabla 22. Valores del coeficiente de arrastre de las paletas (Arboleda, 2000).....	83
Tabla 23. Resultados de los cálculos de parámetros para las cámaras de floculación del diseño final de los floccodecantadores compactos con agitador de turbina.	84
Tabla 24. Resultados de los cálculos de parámetros para las cámaras de floculación del diseño final de los floccodecantadores compactos con agitador de paletas.....	84
Tabla 25. Resultados de los cálculos de parámetros para la cámara de sedimentación del diseño final de los floccodecantadores compactos.....	85

Índice de figuras

Figura 1. Teoría de la doble capa de una partícula coloidal (Romero, 1999).	8
Figura 2. Equipos de mezcla rápida (Barrenechea, 2004).....	11
Figura 3. Floculadores hidráulicos (Barrenechea, 2004).	13
Figura 4. Sedimentador horizontal (Romero, 1999).	15
Figura 5. Sedimentadores Dinámicos (Barrenechea, 2004).	16
Figura 6. Sedimentador laminar (Barrenechea, 2004).	17
Figura 7. Comparación entre un decantador convencional y un decantador tubular/laminar (Barrenechea, 2004).....	21
Figura 8. Flocodecantadores de Planta La Mochita (Valenzuela, 2019).....	23
Figura 9. Filtros de arena de Planta La Mochita.	23
Figura 10. Equipo de mezcla rápida en Planta Hualqui.	24
Figura 11. Equipos floculadores en Planta Hualqui.	24
Figura 12. Sedimentador laminar en Planta de Hualqui.....	25
Figura 13. Croquis de flocodecantadores compactos.	26
Figura 14. Cámara de mezcla rápida de flocodecantadores compactos.	27
Figura 15. Cámara de sedimentación de flocodecantadores compactos.	28
Figura 16. Paletas del flocodecantador.....	37
Figura 17. Efecto del tipo de agitador en la velocidad angular.	46
Figura 18. Efecto de la separación de las lamelas en la velocidad crítica de asentamiento.....	49
Figura 19. Efecto del área superficial cubierta por perfiles en la velocidad crítica de asentamiento.....	50
Figura 20. Tiempo de residencia en función del largo de las cámaras de floculación para diferentes caudales.	51
Figura 21. Velocidad crítica de asentamiento en función del largo de la cámara de sedimentación para diferentes caudales.....	52
Figura 22. Tiempo de residencia del flujo en una cámara de floculación de 3,4 metros de largo del flocodecantador compacto en función del caudal.	55
Figura 23. Tiempo de residencia del flujo en una cámara de floculación 2,3 metros de largo del flocodecantador compacto en función del caudal.	56

Figura 24. Tiempo de residencia del flujo en una cámara de sedimentación en función del caudal.	56
Figura 25. Vista general de la planta de Hualqui.	65
Figura 26. Estanque de floculación de planta de Hualqui.	66
Figura 27. Sedimentador laminar de la planta de Hualqui.	66
Figura 28. Filtros de arena de la planta de Hualqui.	67
Figura 29. Vista lateral de la entrada del agua al flocodecantador compacto.....	68
Figura 30. Vista superior del flocodecantador compacto desde cámara de floculación hacia cámara de sedimentación.....	68
Figura 31. Sedimentador laminar del flocodecantador compacto.	68
Figura 32. Vista hacia la cámara de agua clarificada del flocodecantador compacto.....	69
Figura 33. Cañerías de extracción de agua clarificada (izquierda) y de extracción de lodos (derecha) de flocodecantador compacto.	69
Figura 34. Vista desde la cámara de sedimentación hasta la cámara de floculación del flocodecantador compacto.	69
Figura 35. Lamelas de la cámara de sedimentación del flocodecantador compacto.	70
Figura 36. Gráfico del número de Reynolds en función de la separación de las lamelas.	86
Figura 37. Gráfico de la longitud relativa del sedimentador en función de la separación de las lamelas.....	87
Figura 38. Gráfico de la velocidad crítica de asentamiento en función de la profundidad de los perfiles.	87
Figura 39. Gráfico de la longitud relativa del sedimentador en función de la profundidad de los perfiles.	88
Figura 40. Gráfico del número de Reynolds en función del área superficial cubierta por las lamelas.	88
Figura 41. Gráfico del tiempo de residencia de la cámara de sedimentación en función de su largo.	89
Figura 42. Gráfico del número de Reynolds de la cámara de sedimentación en	

función de su largo.	89
Figura 43. Gráfico de la carga superficial de la cámara de sedimentación en función de su largo.	90
Figura 44. Gráfico del número de Reynolds en función del caudal para la cámara de sedimentación del diseño final de los floccodcantadores.	90
Figura 45. Gráfico de la velocidad de asentamiento en función del caudal para la cámara de sedimentación del diseño final de los floccodcantadores.	91
Figura 46. Gráfico de la carga superficial en función del caudal para la cámara de sedimentación del diseño final de los floccodcantadores.	91
Figura 47. Croquis del diseño final para el floccodcantador de 2 cámaras de floculación	92
Figura 48. Croquis del diseño final para el floccodcantador de 3 cámaras de floculación	93
Figura 49. Croquis del estanque de mezcla rápida.	94
Figura 50. Croquis de la pared entre cámaras de floculación de los floccodcantadores.	94
Figura 51. Croquis de la pared entre la última cámara de floculación y la cámara de sedimentación de los floccodcantadores.	95
Figura 52. Agitador hiperbólico (Lanshen Group, 2019).	95

1. Introducción

El agua potable constituye uno de los pilares fundamentales para la vida humana debido tanto a la necesidad biológica del cuerpo humano como a los diversos usos en los que se emplea para desarrollar la vida en sociedad, tal como el aseo personal. Si bien las fuentes de agua son extensas a lo largo del planeta, no todas corresponden a lo que se define como “potable”, para lo cual debe cumplir con ciertos requisitos que le permiten ser apta para el consumo humano (Toledo, More & Alvial, 2017). Para asegurar esta calidad, se construyen plantas industriales denominadas Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) en las distintas localidades que necesiten un suministro constante de agua.

De acuerdo a la normativa chilena (Resolución 4.423, 2016), las diferentes fuentes de agua pueden clasificarse en cinco tipos (I, II, III, IV y V) dependiendo del tratamiento que se necesite antes de poder ser consumida. El primer tipo corresponde a las fuentes, generalmente subterráneas, en donde sólo se requiere desinfección. El segundo a aquellas en donde se necesite adicionalmente filtración directa, mientras que las demás operaciones como coagulación, floculación y decantación se suman a éstas para fuentes de tipo III. El cuarto tipo comprende las aguas que tengan altas turbiedades y necesiten procesos previos al tratamiento como presedimentación. El último tipo corresponde a aquellas fuentes en donde se utilizan procesos especiales dependiendo de las características propias del agua, como es el caso de los altos niveles de olor y sabor.

Los tamaños de estas plantas dependen, esencialmente, de la densidad de población que abastece y de su cercanía con otras plantas y con fuentes de agua, entre otros parámetros. Para las plantas de mayor tamaño, los equipos son, generalmente, construidos en el sitio de operación ya que representa una mejor opción económica debido a la magnitud requerida. Sin embargo, para plantas que abastecen comunidades más reducidas y, por lo tanto reciben un caudal mucho menor, se prefiere adquirir equipos prediseñados que puedan ser adecuados a las características de la operación.

Para el segundo caso, la empresa Essbio comisionó la construcción de equipos compactos que sean capaces de realizar los procesos de coagulación,

floculación y decantación, los cuales se denominan “flocodecantadores” y fueron instalados en la planta El Roble en la comunidad de Lota. En este caso, la planta recibe agua a partir de una fuente de tipo III, la cual llega desde el embalse Colcura a altos niveles de turbiedad en días de lluvia (Placencia, 2020), siendo así una locación perfecta para evaluar la adaptación del equipo a la variación de las características del flujo de entrada.

Actualmente, la localidad cuenta con 3 plantas de tratamiento de menor tamaño que suministran a una población aproximada de 48.000 habitantes con un crecimiento anual del 2% (Instituto Nacional de Estadísticas, 2021), por lo cual estos equipos representarían una ventaja tanto para mejorar el suministro actual como para una futura expansión de las plantas en esta comuna.

Además, el atractivo de estos equipos recae en que, al tratarse de equipos compactos, presentan la opción de comercialización por parte de la empresa a otras compañías de tratamiento de agua.

El presente trabajo analiza, a partir del funcionamiento de otras plantas similares, el cumplimiento de los parámetros de diseño de estos equipos con respecto a los rangos aplicables que se establecen en la bibliografía existente en el tema. Además, se proponen mejoras de diseño para poder optimizar la operación de los equipos, tanto a través de la mejora de los parámetros como de detalles de diseño que aumentan la eficiencia de remoción de contaminantes del agua tratada.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar el cumplimiento de criterios de diseño hidráulicos y de proceso en equipos compactos de floculación-decantación para el tratamiento de agua potable.

2.2. Objetivos específicos

- Definir parámetros de diseño y rango aplicable a tratamiento de agua potable.
- Verificar si los equipos modulares usados en la empresa sanitaria cumplen los criterios.
- Proponer mejoras de diseño a los equipos analizados, que permitan optimizar los parámetros y la eficiencia de remoción de contaminantes.

3. Marco Teórico

En esta sección se presenta la base teórica en la cual reposa el estudio realizado, en especial sobre los procesos de coagulación, floculación y sedimentación.

3.1. Tratamiento del agua potable

Para poder ser apta para el consumo humano, el agua debe ser sometida a diversos procesos ya que, dependiendo de la fuente a partir de la cual sea extraída, ésta puede ser desde desagradable al gusto hasta contener sustancias perjudiciales para la salud del consumidor (Organización Mundial de la Salud, 2021).

A fin de determinar el tratamiento necesario, se definen ciertos conceptos que permiten calificar la calidad del agua. Algunos son parámetros comunes como las propiedades físicas (temperatura, color, sabor, olor), los constituyentes químicos (alcalinidad, dureza y salinidad) y constituyentes biológicos (microorganismos). Por otra parte, uno de los parámetros más utilizados es la turbiedad, la cual corresponde a la cantidad de luz diseminada por el agua y se expresa en Unidad Nefelométrica de Turbidez (NTU). Este parámetro depende, sobre todo, de las partículas que se encuentran en suspensión en el agua y, por lo tanto, a su número, concentración, masa, tamaño, forma e índice de refracción; por ejemplo, entre más grande es la partícula, menos luz disemina (Arboleda, 2000). A partir de esto, se habla de color aparente cuando se observa el agua sin haber removido la turbiedad y de color verdadero cuando se ha removido. Además, se tiene que el color aumenta de intensidad con el pH y es dependiente de un conjunto de compuestos llamadas sustancias húmicas, entre las cuales se encuentra el ácido fúlvico y el ácido húmico (Arboleda, 2000). Según la Norma Chilena 409, la turbiedad media mensual del agua potable debe ser menor o igual a 2 NTU, además de ser un agua inodora e insípida. Sin embargo, si el agua se obtiene a partir de fuentes superficiales, como es el caso de la planta El Roble, ésta puede presentar una turbiedad incluso mayor a 300 NTU en temporadas de lluvia, mientras que para fuentes subterráneas, el valor de la turbiedad es mucho más cercano al límite legal.

Como ambas fuentes tienen diferentes características, los tratamientos necesarios igualmente difieren. Para una fuente subterránea, el proceso de potabilización puede consistir únicamente de la desinfección, en donde se le añade cloro, la cual es necesaria en cualquier tipo de fuente según la Norma Chilena 409. Este caso corresponde a una fuente de tipo I. En el caso de que el agua tenga un valor de turbiedad mayor que el máximo establecido o presente otras características que afecten su calidad, se requiere de un proceso de filtración directa en lecho granular, independiente de su fuente. Este caso corresponde a una fuente de tipo II. El tipo III corresponde a aguas en donde se necesiten procesos de coagulación, floculación, decantación y filtración, en ese orden, ya que presentan valores aún mayores que el tipo II. Para estas fuentes, se puede requerir igualmente de un proceso complementario como es la oxidación o la adsorción con el fin de eliminar el olor o el sabor que traiga el agua. Si es que estas aguas presentan una alta turbiedad (mayor a 500 NTU), se necesitan procesos anteriores al tratamiento, como la presedimentación, y corresponden al tipo IV. Finalmente, el tipo V contiene a todas las fuentes que necesiten procesos especiales o adicionales para remover sustancias (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2016, Resolución 4.423).

Para el alcance del análisis, se tomó en cuenta el tipo III ya que es el objetivo de los equipos compactos diseñados. Se debe tener presente que las etapas de coagulación, floculación y sedimentación son procesos que disminuyen la turbiedad y demás contaminantes, como el hierro y manganeso presentes en fuentes de pozos profundos, antes de que el flujo sea ingresado a un filtro. Por consiguiente, no es necesario que los valores de estos índices estén dentro del rango normativo a la salida de estos equipos, solo deben estar lo suficientemente bajos para que los filtros no se saturen rápidamente al recibir un flujo que necesite un tratamiento alto.

3.2. Coagulación

3.2.1. Teoría del proceso

En el agua pretratada, existen dos tipos de sólidos suspendidos: los sólidos sedimentables, los cuales pueden ser extraídos a través de una sedimentación

gravitacional, y la materia coloidal, que persiste en suspensión. El proceso de coagulación, también llamado mezcla rápida, consiste esencialmente en la desestabilización de las partículas suspendidas en el agua a través de la utilización de agentes coagulantes, como el sulfato de aluminio, con el objetivo de formar partículas de mayor tamaño y peso, llamados flocs, que puedan sedimentar. Dependiendo de las propiedades del agua que se tenga, se pueden aplicar diferentes tipos de coagulación, por lo cual es esencial conocer las características de los coloides.

Según las investigaciones de Helmholtz y de Gouy y Chapman, las partículas coloidales están rodeadas de 2 capas de iones, la primera llamada “capa adherida”, propuesta por Helmholtz, que consiste en iones positivos que neutralizan la carga negativa que presentan estos elementos, y una “capa difusa”, propuesta por Gouy y Chapman, en donde se encuentran tanto aniones como cationes. Estas capas componen lo que se llama “doble capa” y es en ella donde actúan la mayoría de las técnicas de coagulación (Arboleda, 2000).

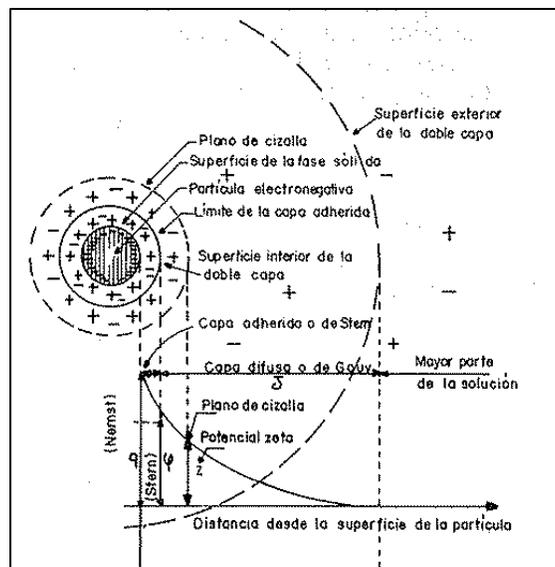


Figura 1. Teoría de la doble capa de una partícula coloidal (Romero, 1999).

El primer mecanismo de coagulación es la neutralización de la carga, la cual se puede realizar con ayuda de un agente coagulante, ya sea al alterar la

concentración de iones que determinan el potencial del coloide o por la adsorción de iones que tengan una carga opuesta a éstos. En este caso, el coagulante sufre una reacción de disociación química en el agua, liberando especies con carga contraria a la que posee la materia coloidal. Es muy importante regular la dosis de coagulante ya que, así como se puede desestabilizar la partícula, se puede igualmente reestabilizar al añadir una mayor cantidad de electrolitos. Además, existe otro mecanismo llamado “compresión de la doble capa” estrechamente ligado al anterior ya que, al introducir un electrolito en el sistema coloidal, se genera un aumento de la densidad de cargas en la capa difusa, la cual tiende a reducir su volumen para lograr seguir siendo eléctricamente neutra, provocando así una dominación de las fuerzas de Van der Waals. Ambos mecanismos suceden de manera muy rápida (entre 1 y 7 segundos) ya que basta solamente con generar el contacto entre el coagulante y las partículas para que se efectúe la coagulación (Barrenechea, 2004).

Si el agua que se desea tratar presenta una cantidad muy pequeña de partículas suspendidas, los mecanismos anteriores tienen una menor efectividad ya que se necesita una difusión altamente efectiva para poder generar la desestabilización necesaria en una gran cantidad de coloides. El mecanismo que se utiliza en estos casos es el de “captura por barrido”. Al utilizar coagulantes de sales metálicas, como el sulfato de aluminio o el cloruro de hierro (III), se generan hidróxidos metálicos a partir de estos compuestos y, si es que su dosis es lo suficientemente alta, se puede generar una saturación de estos productos. Una vez saturado el flujo de agua, los hidróxidos comienzan a precipitar rápidamente arrastrando consigo a los coloides. Este mecanismo no depende de la carga eléctrica del coloide pero sí del producto de solubilidad (K_{ps}) de los hidróxidos generados, el cual mientras menor sea, más rápida será la precipitación. Aun así, esta coagulación se produce de manera más lenta que las anteriores (entre 10 y 90 segundos) (Barrenechea, 2004).

Ahora, la coagulación también puede ser efectuada utilizando polielectrolitos, es decir moléculas poliméricas compuestas por largas cadenas de iones, las cuales generan puentes químicos con los coloides a través de puntos fijos de adsorción en

la molécula. Al ir añadiendo más coloides al polielectrolito, se genera igualmente la floculación ya que se va generando la aglutinación de éstos (Romero, 1999).

Como estos mecanismos pueden suceder al mismo tiempo, se puede controlar la coagulación al elegir correctamente el tipo de coagulante a usar, el pH en el cual se produce la mayor precipitación de hidróxidos, el tiempo de residencia del agua en el equipo utilizado, el gradiente de velocidad del agua y el número de Reynolds del flujo.

3.2.2. Equipos para mezcla rápida

Existen diferentes tipos de equipos para realizar la coagulación, entre los cuales se pueden identificar dos categorías principales: mezcladores rápidos mecánicos e hidráulicos. Los primeros consisten en estanques, generalmente cuadrados o circulares, que cuentan con un agitador para provocar la dispersión necesaria y en donde el coagulante es introducido directamente al estanque. Este equipo permite un buen control del gradiente de velocidad generado ya que, al poseer un agitador mecánico, se puede regular su velocidad de giro fácilmente. Sin embargo, se debe tener cuidado con el vórtice o remolino másico resultante de la componente tangencial de la agitación ya que éste puede reducir la efectividad de la mezcla al reducir la diferencia entre la velocidad del fluido y el impulsor (Romero, 1999). Por otra parte, los mezcladores rápidos hidráulicos presentan una mayor diversidad de opciones para la difusión, ya que pueden consistir desde resaltes hidráulicos o canaletas que disminuyan la sección del flujo (canaleta Parshall), en donde el coagulante es introducido gravitacionalmente en el punto donde se efectúa la variación de la velocidad del caudal, hasta tubos Venturi.

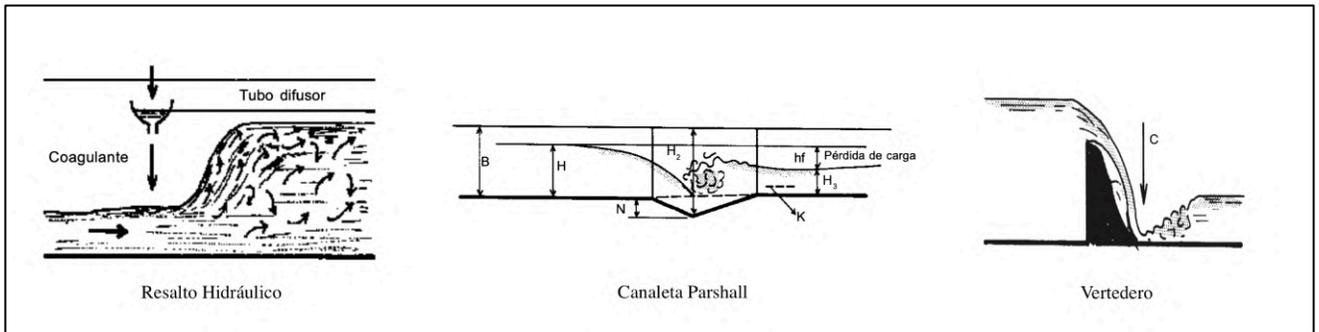


Figura 2. Equipos de mezcla rápida (Barrenechea, 2004).

Sin embargo, estos equipos requieren de una alta energía en el flujo de entrada y, como se trabaja con un caudal de 20 L/s para el estudio de los flocculadores, se optó por analizar en mayor detalle los mezcladores mecánicos. Además, al ser un equipo que puede ser comercializado y que puede tratar caudales con una gran variación en la turbiedad de entrada, se necesita un mayor control en la difusión. Otra buena opción para este objetivo es la instalación de un mezclador en línea, lo cual puede ser considerado como alternativa dependiendo de los costos asociados. En el caso de falla de cualquiera de ambas opciones, se puede utilizar una bomba de agotamiento que genere una salida y entrada a presión del agua para generar la turbulencia requerida (Romero, 1999).

3.3. Floculación

3.3.1. Teoría del proceso

El proceso de floculación, también llamado “mezcla lenta”, ocurre inmediatamente después de la coagulación ya que consiste en la aglutinación de las partículas desestabilizadas con el objetivo de aumentar su peso y tamaño, para formar un “floc”, aumentando así la eficiencia de la sedimentación. En este proceso, están involucrados 3 mecanismos de transporte a través de los cuales se generan los choques entre coloides: floculación pericinética (o browniana), que se genera debido a la energía térmica del fluido; floculación ortocinética (o gradiente de velocidad), la cual es resultado de la agitación del fluido en el estanque de

floculación; y sedimentación diferencial, en la cual las partículas más pequeñas son arrastradas, y consecuentemente aglomeradas, por las que precipitan lentamente. La eficiencia de este proceso depende, al igual que la coagulación, del tiempo de residencia en el equipo y del gradiente de velocidad, el cual tiene que ser mucho menor que anteriormente ya que, al tener un flujo demasiado turbulento, los flocs pueden chocar a una velocidad tan grande que se provoca una ruptura, la cual es difícil de revertir. Debido a esto, la floculación no se realiza en una sola cámara, sino que se compartimenta el proceso para ir disminuyendo el gradiente de velocidad a medida que se aumenta el tamaño de los flóculos (Barrenechea, 2004).

3.3.2. Equipos floculadores hidráulicos

Al igual que para la coagulación, los equipos que se utilizan pueden ser clasificados en 2 categorías: hidráulicos y mecánicos. A su vez, cada categoría puede subdividirse nuevamente: los floculadores hidráulicos se diferencian entre aquellos de flujo horizontal y los de flujo vertical (Barrenechea, 2000).

Los primeros son, sobre todo, utilizados en plantas que tratan un gran caudal de agua debido a que se necesita un espacio considerablemente mayor. Esto se debe a que consisten en estanques en donde se construyen canales interiores separados por pantallas a fin de que se produzca turbulencia en los cambios de dirección del flujo y así generar el choque entre las partículas. Además, a medida que avanza el flujo, los canales se van ensanchando para poder generar la disminución progresiva del gradiente de velocidad, el cual está determinado por la velocidad volumétrica del flujo.

Por otra parte, los verticales pueden tener el mismo concepto que los horizontales, es decir poseer canales por los cuales pasa el flujo alternando entre ascendente y descendente, o pueden usar un diseño de compartimentos, llamado floculador Alabama, en donde el agua entra por el fondo y es impulsado por un codo para generar un movimiento ascendente, el cual luego se transforma en flujo descendente y sale por el fondo hacia otro compartimento, como se muestra en la figura 3. Además, existen floculadores en donde el agua entra tangencialmente generando un movimiento helicoidal y otros en donde se utiliza un medio poroso, el

cual presenta una alta eficiencia ya que la arena promueve una uniformidad en la agitación (Barrenechea, 2000).

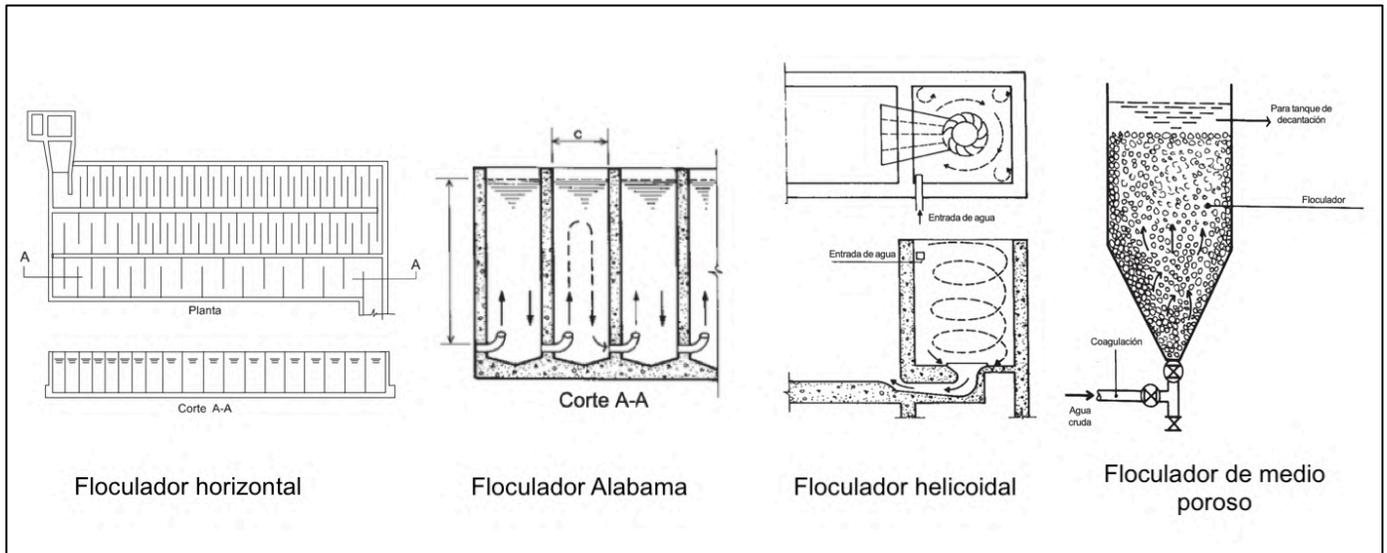


Figura 3. Floculadores hidráulicos (Barrenechea, 2004).

Sin embargo, el principal problema de los floculadores verticales reside en la generación de lodos en el fondo de los equipos ya que se genera una sedimentación de los flóculos, la cual puede ser mayor o menor dependiendo del grado de agitación, la turbiedad de entrada del agua y el diseño del equipo (Barrenechea, 2004).

3.3.3. Equipos floculadores mecánicos

De igual manera, los floculadores mecánicos, que consisten en estanques provistos con un agitador para generar el movimiento necesario, pueden dividirse en 2 subcategorías: rotatorios y reciprocantes. El nombre de estos equipos proviene del movimiento que generan los agitadores, siendo los reciprocantes menos utilizados en la práctica ya que requieren un sistema de paletas que se desplazan verticalmente tanto hacia arriba como hacia abajo. La ventaja de los floculadores mecánicos es que se puede controlar más fácilmente el gradiente de velocidad que se le aplica al flujo y necesitan mucho menos espacio para producir flocs más

grandes, por lo cual corresponden a la mejor opción para un floculador compacto. Sin embargo, se tiene que tener en cuenta el hecho de que es más fácil que se produzca un cortocircuito, por lo cual es importante el diseño correcto del agitador, la mantención de éste y el control de la agitación (Arboleda, 2000).

3.4. Sedimentación

3.4.1. Teoría del proceso

La sedimentación es una técnica de separación de sólidos que poseen una densidad mayor que el líquido en el cual están suspendidos. Los parámetros principales del proceso son el tiempo de residencia del líquido, en este caso el agua, en el recipiente donde se efectúe la sedimentación y la velocidad de caída de las partículas. En general, se habla de velocidad crítica de asentamiento para referirse a la rapidez mínima a la cual caen las partículas; todos los coloides con una velocidad mayor van a llegar al fondo del estanque antes que el agua se retire del equipo (Romero, 1999). Las principales fuerzas involucradas en la sedimentación son las fuerzas de inercia, que impulsan a las partículas en dirección descendiente, la fuerza de empuje, que las mantienen en suspensión, y la fuerza de rozamiento (Arboleda, 2000). Se hace una diferencia entre la decantación en donde sólo afecta la gravedad, llamada caída libre, y la caída interferida, la cual corresponde a la adición de coagulantes para impulsar el proceso (Barrenechea, 2004).

3.4.2. Equipos sedimentadores

Para los sedimentadores, se identifican 3 tipos de equipos diferentes: estáticos, dinámicos, laminares. Los sedimentadores estáticos son estanques en donde el flujo se mueve ya sea en dirección horizontal, vertical o helicoidal, dependiendo del diseño del equipo, y las partículas van decantando en una curva descendiente como lo indica la figura 4.

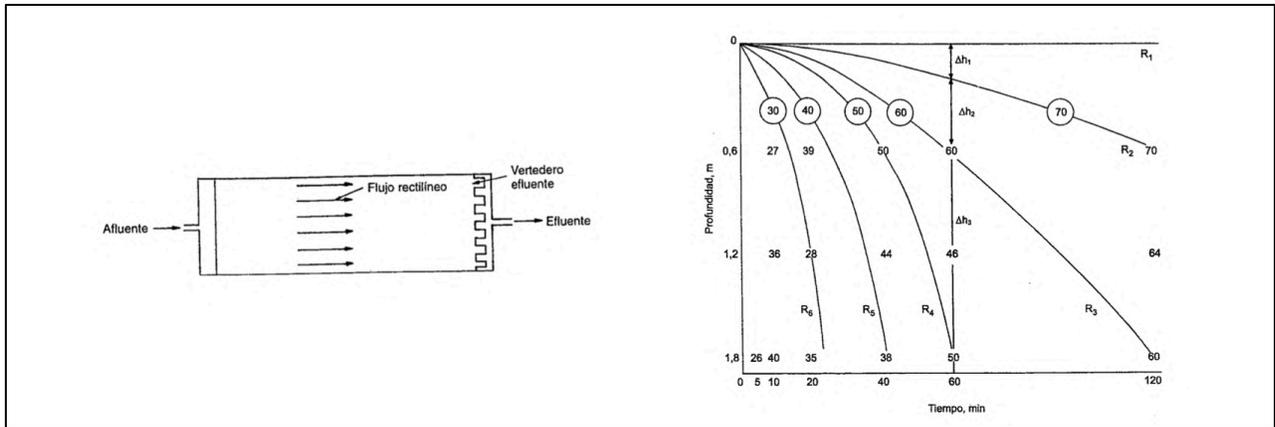


Figura 4. Sedimentador horizontal (Romero, 1999).

Generalmente, para facilitar la remoción de los lodos que se forman al acumularse las partículas en el fondo, el fondo de estos equipos se diseña con una estructura cónica conectada a una válvula de evacuación o a una bomba extractora. Es recomendado utilizar la segunda opción ya que, a fin de evitar el arrastre por una excesiva acumulación, los lodos deberían ser constantemente retirado o mantener una concentración de lodos máxima de 20% del volumen del estanque, sobre todo si no tienen una alta profundidad (Arboleda, 2000). De igual manera, es recomendado que el flujo sea horizontal, ya que, en los equipos verticales, a pesar de necesitarse un espacio menor ya que tienen una mayor profundidad que el resto, el régimen pasa a ser turbulento debido al movimiento rotacional que se produce por el ascenso y descenso de las partículas, lo cual también genera una suspensión de los lodos y su posible ascenso (Arboleda, 2000).

Para poder aprovechar este diseño, se ha estudiado la posibilidad de mantener una cierta cantidad de lodos en los equipos, creando así el diseño de decantadores dinámicos. Como se observa en la figura 5, éstos establecen la entrada del agua directamente en el manto de lodos para generar una turbulencia al chocar contra las paredes del fondo. Estos sedimentadores pueden tener diferentes diseños, los cuales pueden ser hidráulicos o mecánicos, en donde se pueden agitar los lodos o recircularlos y mantener así una cierta capa constante en el equipo. Sin embargo, la complejidad de estos equipos los hace poco eficientes para el objetivo requerido. Además, es necesaria una alta concentración de

partículas, disminuyendo así la versatilidad del equipo frente a los cambios de turbiedad, y se tiene que tener un buen control de la concentración ya que, a mayor cantidad de partículas, éstas pueden ser arrastradas y generar ruptura del floc por esfuerzos cortantes (Arboleda, 2000).

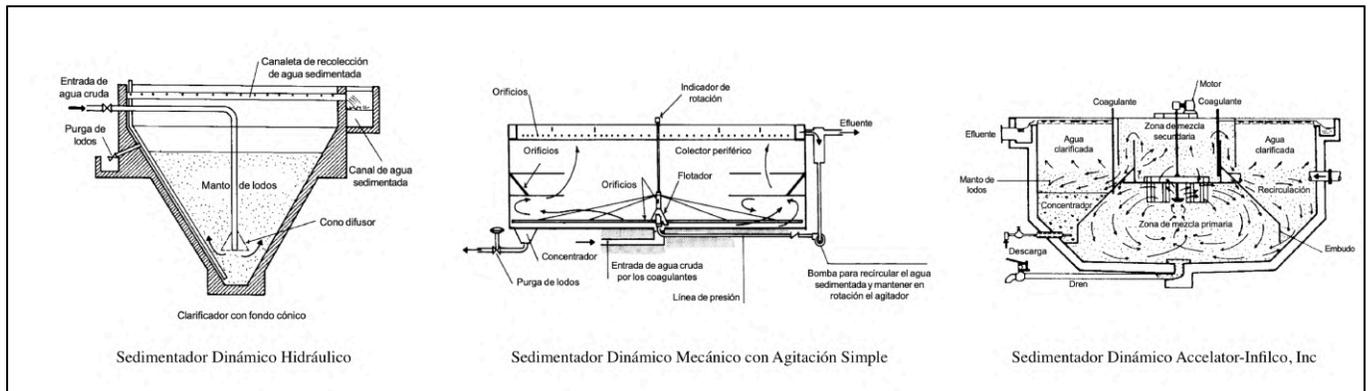


Figura 5. Sedimentadores Dinámicos (Barrenechea, 2004).

Además, las ventajas principales del diseño horizontal es que son capaces de recibir flujos con altas cargas de sólidos y que tienen mínimas zonas de corto circuito donde pueda acumularse lodo.

Por otra parte, las unidades de flujo helicoidal necesitan de una gran superficie ya que el agua entra por diferentes orificios a lo largo de la pared y se retira por el centro de la sección circular del equipo y, por lo tanto, para evitar la suspensión de las partículas, su tiempo de residencia es elevado, mientras que la velocidad del flujo es muy baja.

Como la principal fuerza que genera la caída de los flocs es la gravedad, la velocidad crítica de asentamiento de los flocs va a estar definida principalmente por el peso de éstos. Si se tiene un peso menor al crítico para esas dimensiones del equipo y caudal, las partículas van a seguir en suspensión al momento de que el flujo se retire del equipo. Para poder mejorar la eficiencia de los sedimentadores horizontales, se implementan láminas paralelas, las cuales igual pueden ser módulos de tubos circulares o cuadrados inclinados, cerca de la superficie del equipo para generar una colisión entre éstas y las partículas, dejando pasar así al

flujo y reteniendo los flocs, los cuales aumentan su velocidad de asentamiento (Obando & Uribe, 2021). Al comparar ambos diseños, se observa que los sedimentadores tienen una eficiencia de remoción cercana al 80%, mientras que los sedimentadores laminares presentan una eficiencia mayor al 90%, en promedio para diferentes concentraciones de partículas en suspensión (Guerrero, Salazar & Paredes, 2018). Adicionalmente, al generar el aumento de la velocidad de asentamiento, se necesita un volumen mucho menor del equipo para retirar una cantidad mayor de partículas. Debido a estas ventajas, este es el diseño elegido para el flocodecantador compacto.

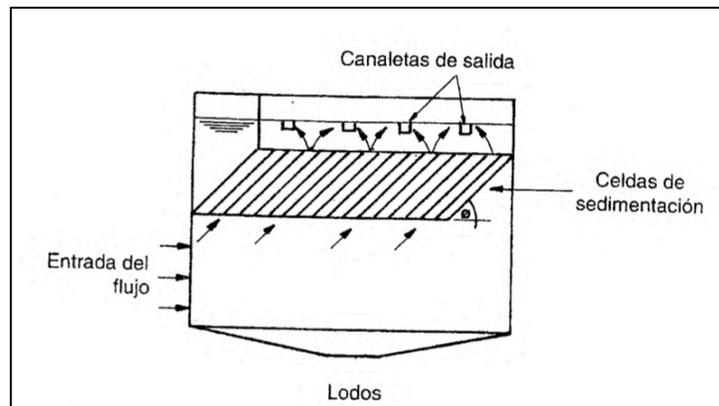


Figura 6. Sedimentador laminar (Barrenechea, 2004).

4. Metodología

En esta sección se detalla el procedimiento que se llevó a cabo para realizar este estudio.

4.1. Investigación Bibliográfica

En primer lugar, para poder conocer los procesos de purificación de agua, se realizó una investigación en tres libros focalizados en el tratamiento de agua, los cuales corresponden a *Aspectos Físicos de la Calidad del Agua* de Ada Barrenechea Martel, *Teoría y Práctica de la Purificación del Agua* de Jorge Arboleda y *Potabilización del Agua* de Jairo Romero. El último de éstos se enfoca más en el diseño de equipos para la industria que en la teoría detrás de los procesos, lo cual está más detallado en los dos primeros.

Una vez comprendida la teoría detrás de los procesos, se procedió a buscar papers y memorias específicas en el diseño de equipos para actualizar la metodología de cálculo de los parámetros de diseño. En el desarrollo de la investigación, se constató que el libro de Arboleda es el más referenciado tanto en los demás libros como en los informes de memorias y papers encontrados, por lo cual funciona como la base de los cálculos de éstos.

Como la purificación del agua difiere depende de la fuente y la calidad de agua que se tiene, las cuales son difíciles de generalizar, se han realizado pocas mejoras en los métodos de cálculos para los diseños de equipos, sobre todo en el caso de la floculación. El mejor método es emplear un simulador o un modelo computacional para caracterizar la calidad del agua y la distribución de partículas a lo largo de los equipos. Sin embargo, esta opción presenta un problema: al realizarse este estudio durante los meses de agosto a diciembre, si se hubieran tomado muestras del agua de la planta El Roble, éstas no habrían sido representativas de los meses de lluvias más intensas en donde el agua llega en su peor calidad. Esto es importante ya que se necesita la distribución de tamaños inicial de las partículas coloidales presentes en el agua para estas metodologías (Fan, Xu, Ke & Shi, 2007).

Adicionalmente, se tiene una mayor innovación en la tecnología de sedimentación que para la coagulación y floculación ya que, en el caso de los equipos mecánicos, los parámetros están definidos por el volumen y la velocidad de agitación. Por lo tanto, no hay un amplio margen de mejora, no así en la sedimentación, en donde los parámetros igual dependen del tipo de equipo que se utiliza y su diseño.

Debido a estas razones, la mayoría de los cálculos fueron realizados utilizando las metodologías de los libros mencionados anteriormente, a excepción de algunos casos en donde se utilizaron fórmulas de memorias de cálculo específicas al equipo diseñado, como es el caso de los agitadores mecánicos.

4.2. Definición de Parámetros de Diseño

4.2.1. Coagulación y Floculación

Los procesos de mezcla rápida y mezcla lenta, al ser ambos realizados en equipos mecánicos que consisten en un estanque con un agitador, poseen los mismos parámetros de diseño, cambiando solamente los valores de éstos dependiendo de los requerimientos del proceso.

El primer parámetro es el tiempo de residencia y, como su nombre lo indica, corresponde al tiempo en que el flujo de agua se retiene en el equipo antes de ser retirado. Como la coagulación necesita una agitación muy rápida, este parámetro tiene un valor mucho menor que para la floculación y aún menor que para la sedimentación.

El parámetro más importante de estos procesos es el gradiente de velocidad, el cual corresponde a la variación espacial de la velocidad del fluido, es decir que, dependiendo de cuál será el recorrido que sigan las partículas, éstas tendrán una velocidad diferente (Weber, 1979). En los floculadores hidráulicos, su valor está influenciado por el caudal y el área transversal de los canales a través de los cuales pasa el flujo. Lógicamente, en un equipo mecánico, el gradiente está determinado por la velocidad de agitación y, lo más cerca de las paletas del agitador que estén las partículas, mayor serán tanto su velocidad como el gradiente de velocidad.

Desde un punto de vista físico, este gradiente puede ser interpretado como una disipación de la energía por unidad de volumen, lo cual es utilizado para establecer la metodología de cálculo del parámetro (Ghawi, 2018). Nuevamente, la coagulación presentará valores más elevados del gradiente de velocidad que la floculación debido a la intensidad de la agitación que se necesita y por el hecho de que altos gradientes de velocidad pueden generar el rompimiento de flocs grandes. Además, el valor óptimo de esta variable se determina a partir de un ensayo experimental que depende de la cantidad de coloides presentes en el flujo de entrada al equipo, por lo tanto, si el floccodcantador compacto va a ser utilizado en diferentes plantas de tratamiento, se necesita un mayor control y capacidad de variación para este parámetro, lo cual refuerza la decisión de ocupar equipos mecánicos en el diseño.

El parámetro final de estos procesos es el número de Reynolds, un número adimensional propio a cualquier fluido en movimiento. Esta constante permite establecer el comportamiento del flujo como laminar o turbulento dependiendo de su velocidad, viscosidad y densidad. Para la coagulación y floculación, como el flujo necesita tener una agitación considerable, el flujo debe ser turbulento, al contrario de la sedimentación donde se necesita un comportamiento laminar para que las partículas puedan descender y no sean arrastradas con el flujo del agua (Mott, 2006).

4.2.2. Sedimentación

El parámetro más importante en la sedimentación es la carga superficial, la cual corresponde a la velocidad crítica mínima de sedimentación. Es decir, a partir de este valor, todas las partículas que tengan una velocidad de asentamiento mayor sedimentarán en el fondo del equipo. Como se puede observar en la figura 7, la eficiencia del sedimentador está estrechamente ligada a la carga superficial y, si esta última aumenta, la primera disminuye.

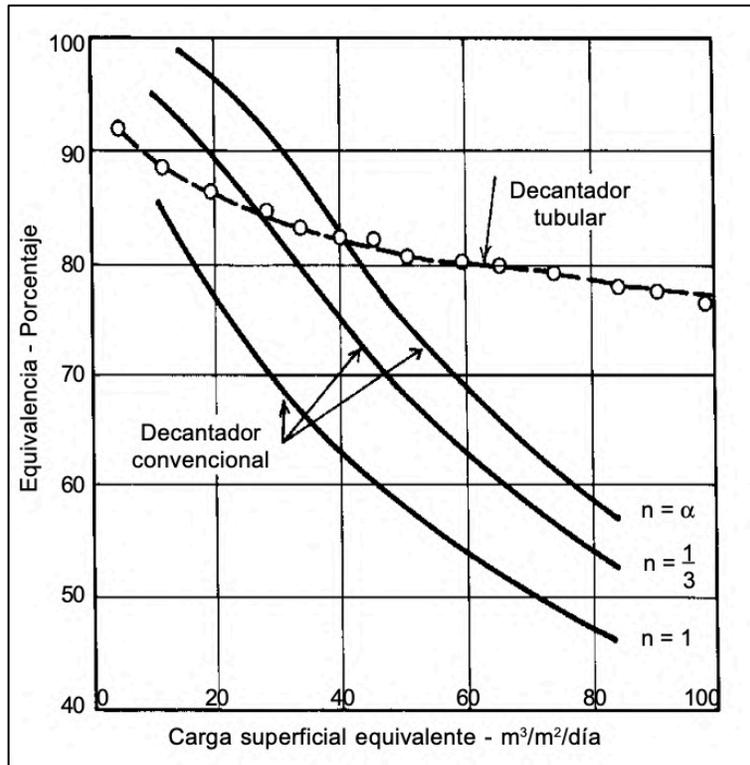


Figura 7. Comparación entre un decantador convencional y un decantador tubular/laminar (Barrenechea, 2004).

Generalmente, se debe determinar una carga superficial óptima para tener una calidad de salida de acuerdo con la regulación normativa, sin embargo, como el agua de la planta El Roble presenta variaciones en la calidad de entrada dependiendo de la fuente y de la cantidad de lluvia que se haya tenido y, además, el objetivo del equipo compacto es que sea utilizado en diferentes localidades, este parámetro no tiene un valor fijo. Por lo tanto, mientras menor sea este valor, mejor será la eficiencia del equipo (Arboleda, 2000).

Además de este parámetro, se toma en cuenta la velocidad media horizontal del agua a lo largo del equipo, la cual está relacionada tanto con el caudal de operación como con el volumen del equipo. De manera evidente, este parámetro solamente es relevante en sedimentadores horizontales. Se debe controlar de manera correcta esta variable ya que, así como una velocidad alta permite que las partículas choquen entre ellas y se genere una aglomeración para aumentar la

eficiencia del proceso, también puede causar un arrastre y una resuspensión de los flóculos del fondo (Arboleda, 2000).

Por último, en el diseño de los sedimentadores laminares, se deben tomar en cuenta parámetros propios a este modelo: la longitud relativa del equipo y el ángulo de inclinación de las placas paralelas. El segundo de éstos es el más importante ya que si tiene un valor muy bajo, se corre el riesgo de que los lodos decantados se estanquen y terminen bloqueando el espacio entre placas (Blanco, 2004).

4.3. Visitas a Terreno

A lo largo del estudio, se realizaron visitas a terreno a 3 plantas de tratamiento de agua potable de la empresa ESSBIO S.A. con el objetivo de rescatar valores e información de los procesos que se llevan a cabo, siendo una de ellas la planta El Roble en donde se encuentran los flocodecantadores compactos.

La primera visita a terreno fue a la planta La Mochita en la comuna de Chiguayante, la cual procesa un flujo actual de 1.650 L/s que abastece a toda esta comuna, así como también a Concepción, Hualpén y Talcahuano. En esta planta, la floculación y la sedimentación se realizan en equipos hidráulicos circulares que se muestran en la figura 8, de los cuales hay 4 en esta planta. El agua, ya provista de coagulantes poliméricos, entra por el centro del equipo, avanza radialmente a lo largo de la sección que corresponde al floculador y luego entra por la parte inferior de la pared al decantador, del cual sale a través de los canales superiores que se observan en la figura.



Figura 8. Floccodecantadores de Planta La Mochita (Valenzuela, 2019).

Posteriormente, el agua pasa por un proceso de filtración, que se observa en la figura 9, para poder llevar los valores de los parámetros de calidad del agua a un nivel aceptable por la normativa. Generalmente, los valores de turbiedad de entrada a los filtros, posteriormente al proceso de floculación y decantación, son menores a 10 NTU, lo cual no representa un tratamiento intenso para estos equipos.



Figura 9. Filtros de arena de Planta La Mochita.

La segunda visita a terreno se realizó en la Planta de Tratamiento de Agua Potable de la comuna de Hualqui para observar el diseño de equipos construidos específicamente para esa ubicación. La ventaja de esta planta, en términos del estudio realizado, es que su caudal de operación normal es de 20 litros por segundo, la misma capacidad que poseen los flocodecantadores compactos. Aparte, se utilizan los mismos conceptos teóricos para el diseño de sus equipos, es decir que los procesos de mezcla rápida y floculación se llevan a cabo en estanques con agitadores mecánicos, mientras que en la sedimentación se emplean sedimentadores laminares. El tratamiento de esta planta termina en un filtro de arena al igual que en la Planta La Mochita, solo que éste es un filtro a presión, como se muestra en la figura 28 del anexo A.

La coagulación se efectúa por goteo del coagulante hacia un estanque con un agitador industrial de turbina, como se observa en la figura 10, mientras que en la floculación se utilizan tres equipos que poseen cada uno un agitador de paletas giratorias, lo cual está presentado en la figura 11 pero no se logran observar las paletas debido a la turbiedad del agua.



Figura 10. Equipo de mezcla rápida en Planta Hualqui.



Figura 11. Equipos floculadores en Planta Hualqui.

En esta visita se rescataron los valores de la velocidad de agitación de cada equipo, así como también los volúmenes de éstos para luego poder calcular los parámetros propios a los procesos. Adicionalmente, se obtuvo información sobre el diseño de los floculadores como el hecho de que, a medida que el flujo avanza en cada cámara de floculación, la velocidad de agitación va disminuyendo para tener un gradiente de velocidad menor en cada una de ellas y que la ubicación de la salida de cada cámara va alternando entre la parte superior y la parte inferior de éstas.

Una vez que se termina la floculación, el flujo es llevado a un sedimentador de placas paralelas que se observa en la figura 12. Para este equipo se obtuvo información tanto sobre su volumen como sobre especificaciones de los módulos rectangulares inclinados que actúan como placas paralelas, sobre todo su profundidad y el espacio entre ellos.



Figura 12. Sedimentador laminar en Planta de Hualqui.

Finalmente, se llevó a cabo una visita a terreno a la Planta El Roble en la comuna de Lota con el fin de conocer los floccodecantadores modulares y, a la vez,

de entender las condiciones de operación de la planta, así como también los problemas que se tienen.

Los detalles operacionales de los equipos tuvieron que ser descritos por los operadores de la planta ya que éstos no se encontraban en funcionamiento. Debido a que se genera una cantidad excesiva de lodos en todo el equipo, el lavado de ellos se debe realizar mínimo cada 2 semanas, lo cual impide el funcionamiento correcto de la planta y, por lo cual, se utilizan solamente cuando se tiene una gran turbidez de entrada.

El tratamiento en esta planta consiste principalmente en la coagulación, floculación y sedimentación que se lleva a cabo en los equipos compactos y una filtración llevada a cabo en filtros de arena a presión, al igual que en la Planta de Hualqui.

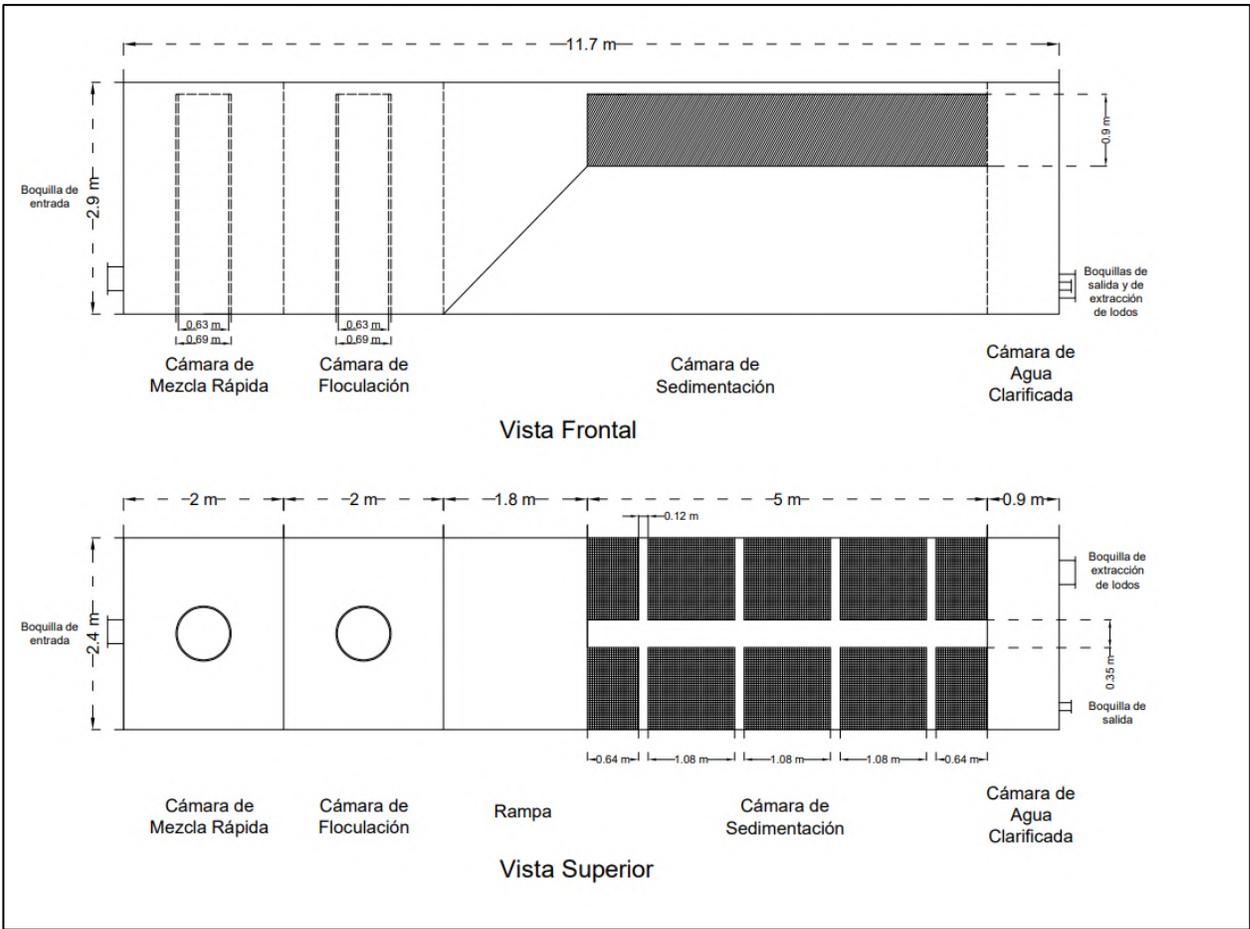


Figura 13. Croquis de floccodecantadores compactos.

Los floccodecantadores consisten en contenedores industriales de 40 pies de largo que poseen tres cámaras distintas, como se observa en la figura 13. En base a esta figura, el flujo entra por el lado izquierdo, a través de una tubería ubicada en la sección inferior del equipo, hacia la cámara de mezcla rápida, que corresponde a la primera cámara y que se puede observar en la figura 14.



Figura 14. Cámara de mezcla rápida de floccodecantadores compactos.

Luego, el flujo sigue hacia la cámara de floculación a través de un espacio en la sección inferior de la pared que separa ambas cámaras. Sin embargo, durante la operación del equipo, se generó una gran cantidad de lodo sedimentado en la primera cámara, por lo cual los operadores de la planta tuvieron que construir un sistema de un tubo de PVC que tomara el agua desde el fondo del espacio destinado a la mezcla rápida, pasara por sobre la pared y volviera a bajar hasta el fondo de la sección de floculación. Además de este inconveniente, esta cámara no posee una boquilla de desagüe, solo se tiene la boquilla de entrada, como se observa en la figura 29 del anexo A, lo cual dificulta el lavado correcto del equipo.

Para solucionar este obstáculo, los operadores generaron un sistema de succión por vacío en la misma cañería de entrada.

Otro de los problemas que se encontró al revisar el equipo es que los agitadores están recubiertos por un cilindro de concreto, como se observa en la figura 14, el cual impide la buena mezcla del flujo de agua, un requerimiento esencial tanto para la coagulación como para la floculación.

Una vez realizada la floculación, el flujo de agua pasa a través de un espacio en la sección inferior de la pared del floculador hacia una especie de rampa que lo empuja hacia la cámara de sedimentación. Esta última etapa del equipo se muestra en la figura 15 y posee perfiles de tubos cuadrados inclinados con un espacio de 3 cm entre cada uno y una profundidad de 90 cm. Para poder retirar los lodos generados, el fondo cuenta con una tolva que los recibe y los compacta a través de la inclinación que posee.



Figura 15. Cámara de sedimentación de flocculadores compactos.

El principal problema con esta cámara es que los perfiles metálicos cuadrados se han ido rompiendo con la intensidad del agua de retrolavado, lo cual disminuye la eficiencia de la sedimentación. Los que se observan en las figuras 31 y 35 del anexo A han estado en operación 2 años y ya se encuentran en un estado bastante deteriorado.

Para poder retirar el agua clarificada del equipo, se pasa el flujo desde la cámara de sedimentación por una canaleta central hacia la cámara final en donde se ubican las boquillas de salida. No obstante, se tiene que el proceso no se realiza de manera correcta ya que, de acuerdo con lo expresado por los operadores de planta, el agua sigue presentando una gran cantidad de material coloidal suspendido en la cámara final.

Por otro lado, la entrada de agua al equipo es constante ya que se tienen 2 fuentes de alimentación principales: un estanque captador en el cerro y la planta elevadora de Lota. Como la segunda fuente posee bombas, se puede regular el caudal que se alimenta, pero la primera llega a El Roble solo por impulso gravitacional, por lo cual no hay forma de controlarlo. Para evitar un rebalse de los equipos, los operadores aumentan el caudal de salida de los floccodecantadores ya que este se deposita en estanques de almacenamiento antes de pasar a los filtros, pero esto provoca una disminución en la eficiencia del equipo y, en consecuencia, un aumento en la turbiedad de salida.

4.4. Metodología de Cálculo

4.4.1. Parámetros Coagulación y Floculación

Para el cálculo de los parámetros de coagulación y floculación se utilizaron las fórmulas entregadas por el libro *Potabilización del Agua* de Jairo Romero. Como se trata de mezcladores mecánicos, el gradiente de velocidad G se calcula utilizando la potencia P entregada por éste al fluido a través de las siguientes ecuaciones.

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (1)$$

$$P = K\rho N^3 d^5 \quad (2)$$

Donde μ corresponde a la viscosidad dinámica del agua en $N \cdot s/m^2$, V al volumen del estanque en m^3 , ρ a la densidad del agua en kg/m^3 , d al diámetro del impulsor en metros, N a la velocidad del impulsor en revoluciones por segundo (rps) y K es una constante adimensional que depende del tipo, forma y tamaño del impulsor. Los valores de K están presentados en la tabla 13 del anexo B.

El valor calculado por la ecuación (2) corresponde a la potencia teórica entregada, por lo cual, para obtener el valor real de la potencia del motor, se debe multiplicar por un coeficiente de pérdida por fricción C_f y dividir por la eficiencia ε del agitador (Castillo, 2013).

$$P_{real} = \frac{P \cdot C_f}{\varepsilon} \quad (3)$$

Además, se puede calcular el número de Reynolds a través de la siguiente ecuación.

$$N_{RE} = \frac{\rho N d^2}{\mu} \quad (4)$$

El parámetro de tiempo de residencia se calcula, de igual manera que para cualquier estanque, dividiendo el volumen de éste por el caudal Q del flujo.

$$t = \frac{V}{Q} \quad (5)$$

4.4.2. Parámetros Sedimentación

Para los cálculos de los parámetros de la sedimentación, se utilizó igualmente el libro de Romero.

El parámetro más importante de este proceso es la carga superficial y, dependiendo del tipo de equipo utilizado, tiene diferentes ecuaciones para determinarlo. En el diseño de un sedimentador laminar, es importante conocer tanto el valor sin las placas paralelas como con éstas ya que se cuantifica el incremento de la eficiencia. Además, el parámetro de carga superficial sin placas permite determinar el volumen del sedimentador dependiendo del caudal que se quiera tratar; es sobre todo importante para equipos de sedimentación en cuyo diseño se

pueda variar la profundidad, a diferencia de estos flocodecantadores cuya profundidad está determinada por las dimensiones del contenedor, ya que, al tener una carga superficial menor y una profundidad mayor, las partículas toman más tiempo en llegar al fondo y el proceso toma más tiempo.

$$CS = \frac{Q}{A} \quad (6)$$

$$v_{sc} = \frac{S_c v_o}{\text{sen}\theta + L_c \cdot \text{cos}\theta} \quad (7)$$

Para poder diferenciarlas, se hablará de carga superficial para el primer caso, la cual se calcula con la ecuación (6), y de velocidad crítica de asentamiento para el segundo, que se calcula con la ecuación (7). Estos parámetros están en $\frac{m^3}{m^2 \cdot d}$ o $m/día$. En estas ecuaciones, A corresponde al área superficial del sedimentador en m^2 , S_c es una constante adimensional cuyo valor depende del tipo de perfiles que se utilice, v_o a la velocidad promedio del agua en el elemento de sedimentación de alta tasa en $m/día$, θ al ángulo de inclinación de los perfiles y L_c la longitud relativa del sedimentador de tasa alta en flujo laminar corregida en la longitud de transición. Los valores de S_c se pueden encontrar en la tabla 14 del anexo B.

En general, en los sedimentadores laminares, se tiene una región en donde el flujo pasa de turbulento a laminar, llamada región de transición, por lo cual L_c corresponde a la diferencia entre la longitud relativa L y la longitud relativa de esa región L' .

$$L_c = L - L' \quad (8)$$

La longitud relativa del sedimentador L se puede determinar a través de la ecuación (9), mientras que para la longitud relativa de la región turbulenta depende del tipo de perfil si se usa la ecuación (10), para tubos circulares, o la ecuación (11), para placas paralelas y conductos cuadrados.

$$L = \frac{l}{e} \quad (9)$$

$$L' = 0,058 N_{RE} \quad (10)$$

$$L' = 0,013 N_{RE} \quad (11)$$

Donde l corresponde a la longitud de los perfiles y e a la separación entre placas. A diferencia del tiempo de residencia, el número de Reynolds se calcula de manera diferente que en la coagulación y en la floculación ya que no se tiene agitador en este caso.

$$N_{RE} = \frac{v_o e}{\nu} \quad (12)$$

Donde ν corresponde a la viscosidad cinemática del agua en m^2/s .

Para poder utilizar las ecuaciones (7) y (12), se debe conocer el valor de v_o , el cual se calcula usando la ecuación (13).

$$v_o = \frac{Q}{A \cdot \text{sen}\theta} \quad (13)$$

Además, como cada lamela actúa como un compartimiento diferente de sedimentación, este parámetro permite determinar el tiempo de retención del flujo en ellas utilizando la ecuación (14).

$$t_p = \frac{l}{v_o} \quad (14)$$

A parte de estos parámetros, se puede determinar la velocidad horizontal del flujo en el sedimentador a través de la siguiente ecuación.

$$v_h = \frac{Q}{A_t} \quad (15)$$

Donde A_t corresponde al área transversal del equipo en m^2 .

4.5. Rango de Parámetros

Para poder tener una mayor certeza sobre el rango utilizado como referencia, se obtuvieron rangos de los parámetros de diferentes fuentes. Estos rangos se muestran en las siguientes tablas. Para la mezcla rápida, se toma en cuenta sobre todo la coagulación por barrido ya que, al ser la más lenta, también se produce coagulación por adsorción en ese tiempo.

Tabla 1. Rango de parámetros de coagulación.

Referencia	Arboleda	Romero	Barrenechea	Syifaul & Ayu & Ratnaningsih	Rango de referencia
Gradiente de velocidad (s^{-1})	Coagulación de barrido: 400-800 Coagulación por adsorción: 1.000-3.000	700-1.000	Coagulación de barrido: 700-1.000 Coagulación por adsorción: >3.000	100-1.000	400-1.000
Tiempo de retención (s)	Coagulación de barrido: 30-180 Coagulación por adsorción: 1-5	10-90	Coagulación por adsorción: 1-7	10-300	10-100
Número de Reynolds	-	>100.000	-	-	>100.000

Tabla 2. Rango de parámetros de floculación.

	Arboleda	Romero	Barrenechea	Syifaul & Ayu & Ratnaningsih	Rango de referencia
Gradiente de velocidad (s^{-1})	20-60	20-100	20-75	20-100	20-100
Tiempo de retención (min)	15-30	10-60	10-30	30-60	10-30

Tabla 3. Rango de parámetros de sedimentación.

	Arboleda	Romero	Blanco	Barrenechea	Syifaul & Ayu & Ratnaningsih	Rincón, Herrera & Ortiz	Rango de referencia
Tiempo de retención (min)	60-90 (decanta dores convenci onales)	15-25	-	-	40-90	8-25	15-25
Tiempo de retención en placas (min)	-	3-6 (tubos) 15-25 (placas)	-	-	-	8-25	3-25
Velocidad de asentamiento (m/d)	13-60 (flóculos de sulfato de aluminio)	15-90	-	10-60	-	15-60	15-60
Carga superficial (m/d)	120-185	120-300	<180	60-240	48-216	60-180	120-240
Número de Reynolds	100-500	<250	80-250	<500	-	<500	80-250
Velocidad media horizontal (m/s)	-	200- 1.300	-	-	-	-	200-1.300

4.6. Verificación de Parámetros

Para todos los cálculos, se tomó en cuenta la viscosidad cinemática del agua con un valor de $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, la viscosidad dinámica de $1 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ y la densidad de $997 \text{ kg}/\text{m}^3$.

En primera instancia, se utilizaron los datos de volumen y velocidad de agitación de la planta de Hualqui para poder determinar los parámetros de gradiente de velocidad, número de Reynolds y tiempo de residencia del equipo de mezcla rápida de esta planta utilizando las ecuaciones de la (1) a la (5). En este caso, se consideró un agitador de turbina y 6 paletas curvas ($K = 4,8$).

De igual manera, se calcularon los parámetros anteriores para las 3 cámaras de floculación de la planta. Sin embargo, como éstas utilizan agitadores de paletas, la potencia se debe calcular con las siguientes ecuaciones (Baque, 2001).

$$P = \frac{C_d \cdot \rho \cdot A_p \cdot v^3}{2} \quad (16)$$

$$v_g = 0,75v_p \quad (17)$$

$$v_p = 2\pi NR \quad (18)$$

Donde C_d corresponde al coeficiente de arrastre de las paletas, cuyo valor se obtiene de la tabla 22 del anexo C, A al área total de las paletas en m^2 , v_g a la velocidad de giro relativa de las paletas con respecto al fluido en m/s , v_p a la velocidad de las paletas en m/s , R al radio de giro de las paletas en metros.

Luego, con la información de los sedimentadores laminares y las ecuaciones (5) a (15), se calcularon los parámetros de carga superficial, velocidad crítica de asentamiento, velocidad horizontal, tiempo de residencia y número de Reynolds de estos equipos con el caudal de operación de 20 litros por segundo.

Teniendo estos datos, se realizó el cálculo inverso para el caso de los floccodcantadores. A partir de los valores de gradiente de velocidad de la planta de Hualqui, se determinaron las velocidades de agitación de las cámaras de mezcla rápida y de floculación. Esta vez, para ambos casos, se utilizó la ecuación (2) para la potencia entregada y se consideraron agitadores de hélice, pitch = 2 y 3 aletas ($K = 1$). Además, se calcularon los tiempos de residencia de cada cámara y, en el

caso del sedimentador, ya que el diseño define los valores de los parámetros, se calcularon directamente a partir de la información rescatada de este equipo.

De esta manera, se pueden comparar los parámetros con los de una planta que lleva años en funcionamiento y se puede verificar si éstos están dentro de los rangos aceptables por la teoría.

4.7. Diseño del floccodecantador compacto

Una vez que se verificaron los valores de los parámetros de los equipos compactos, se realizó una modificación del diseño de éstos cambiando variables como la velocidad de agitación, las dimensiones de los perfiles de placas y el volumen de cada cámara para adecuar los parámetros de diseño y asegurar que sus valores estén dentro del rango óptimo según la teoría. Para el volumen de las cámaras, como no se puede variar ni el ancho ni la profundidad de los equipos, ya que se construyen a partir de contenedores con dimensiones reguladas, la variación se realizó para la longitud de ellas.

Con el objetivo de tener un diseño que se ajustara a los valores de una planta existente con valores de operación similares a los de estos equipos, se realizaron cálculos que permitieran obtener los valores de gradiente de velocidad, tiempo de residencia, carga superficial y velocidad crítica de asentamiento obtenidos para la planta de Hualqui. Además, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones, a parte de los rangos mencionados anteriormente.

- La relación entre la altura h del estanque de mezcla rápida y su diámetro equivalente D se ubica restringida por los siguientes valores:

$$0,75 \leq \frac{h}{D} \leq 1,3$$

Para este caso, se eligió un valor de 1 (Arboleda, 2000).

- La relación entre el diámetro del impulsor del agitador y del diámetro equivalente del equipo debe ser de 1:3 ya que, si este último es mayor, la agitación no es efectiva y, si es menor, el agitador puede vibrar y romperse por fatiga (Arboleda, 2000).

- Para la mezcla rápida, se utilizan agitadores de hélice, pitch = 2 y 3 aletas ($K = 1$).
- La eficiencia del motor de los agitadores se fijó en 70% y el coeficiente de pérdidas por fricción en 1,35 (Arboleda, 2000).
- Para el diseño del floculador, se tomaron en cuenta dos casos: una agitación con los mismos equipos que en la mezcla rápida y otra con agitadores de paletas horizontales. Este segundo diseño se llevó a cabo utilizando las ecuaciones siguientes (Baque, 2001).

$$A_p = C \cdot W_f \cdot h_f \quad (19)$$

Donde C corresponde al porcentaje de la sección transversal del floculador que ocupan las paletas, el cual debe ser menor a 20% para evitar la formación de un vórtice alrededor del eje, A_p corresponde al área total de las paletas, W_f y h_f al ancho y profundidad del floculador, respectivamente.

$$A_p = N^{\circ} \text{ paletas} \cdot W_p \cdot L_p \quad (20)$$

Donde W_p corresponde al ancho de las paletas y L_p al largo de las paletas.

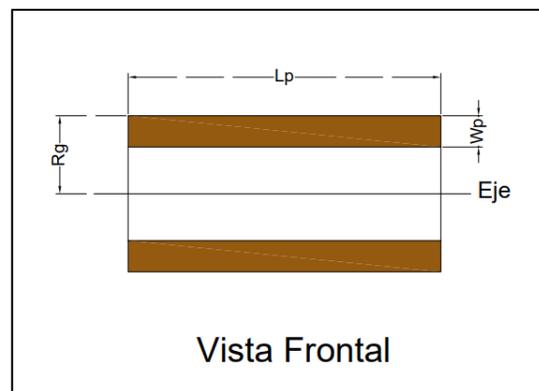


Figura 16. Paletas del flocodecantador.

Generalmente, se toma la consideración de que los extremos de los agitadores deben estar separados entre ellos por más de 0,60 metros y del fondo del estanque por un espacio entre 0,15 a 0,30 metros. Para este diseño, se tomó un espacio entre paletas de 1 metro y de 0,20 al fondo. Además, se consideraron 2 paletas por floculador.

$$v_g = \sqrt[3]{\frac{2P}{C_d \cdot A_p \cdot \rho}} \quad (21)$$

De la ecuación (16) se obtiene:

$$v_p = \frac{v_g}{0,75} \quad (22)$$

Para obtener un proceso eficiente, la velocidad de las paletas debe tener un valor entre 0,30 y 0,90 m/s (Baque, 2001).

De ahí, la velocidad angular en rps se calcula con la ecuación (23) y la potencia en el eje corresponde a la potencia P multiplicada por un factor de eficiencia, el cual se establece en un valor de 3,5 (Baque, 2001).

$$N = \frac{v_p}{2\pi \cdot R} \quad (23)$$

La razón de utilizar agitadores de paletas con eje horizontal es que se logra obtener flóculos más grandes, generando así una mejor sedimentación y disminuyendo la carga del filtro. Este tipo de agitadores es sobre todo utilizado cuando se ocupan filtros de arena (Romero, 1999).

- La longitud relativa del sedimentador L debe ser menor a 40, con un valor óptimo de 20 (Romero, 1999).
- La razón entre la longitud de las placas o lamelas y la distancia de espaciamiento entre ellas, cuyo valor se recomienda de 5 centímetros, debe ser mayor a 8:1 para tener una alta eficiencia (Rincón et al., 2014)
- El flujo de agua a través de las boquillas debe ser de 0,2 m/s y el diámetro de estos componentes se determina con las ecuaciones (24) y (25).

$$D_b = \sqrt{\frac{4A_b}{\pi}} \quad (24)$$

$$A_b = \frac{Q}{v_b} \quad (25)$$

Donde D_b y A_b corresponden al diámetro y al área transversal de la boquilla, respectivamente, y v_b a la velocidad del flujo a través de la boquilla.

A partir de los resultados obtenidos, se realizaron diferentes análisis de sensibilidad para poder obtener el diseño óptimo del equipo. En primer lugar, se observó el impacto del tipo de agitador en la velocidad angular para definir el equipo que entrega mejores resultados de agitación a menor velocidad.

Por otra parte, se analizó el mejor tipo de lamelas para el sedimentador, así como también sus dimensiones y el área superficial que cubren estos perfiles, comparando los resultados de tiempo de retención, velocidad crítica de asentamiento y número de Reynolds obtenidos. El primer parámetro se determina utilizando una base de cálculo de velocidad crítica de asentamiento, velocidad de flujo y separación entre lamelas. A partir de esta información, se usa la ecuación (7) para obtener la longitud relativa L_c y las ecuaciones (10) y (11) para obtener L' . Así, se puede calcular la longitud relativa del sedimentador L y, a partir de ésta y la ecuación (9), la longitud l de los perfiles. Finalmente, el tiempo de retención en las lamelas se calcula utilizando la ecuación (14).

Gracias a estos primeros análisis, se pudo realizar un estudio más completo del equipo, en donde se fue variando el largo de cada cámara y se registró el efecto en el tiempo de residencia de cada cámara, el número de Reynolds, la carga superficial y la velocidad crítica de asentamiento del sedimentador.

5. Resultados y Discusiones

5.1. Verificación de Parámetros

5.1.1. Planta de Hualqui

Como se mencionó anteriormente, se realizó una verificación de los parámetros de diseño de los equipos operativos en la planta de Hualqui, los cuales corresponden a estanques de coagulación, floculación y sedimentación construidos en la ubicación de la planta, a partir de la información presente en la tabla 4 que fue obtenida en una visita a terreno.

Tabla 4. Información obtenida en terreno de la planta de Hualqui.

Equipo	Velocidad angular del agitador (rpm)	Largo del equipo (m)	Ancho del equipo (m)	Profundidad del equipo (m)	Diámetro del impulsor/paletas (m)
Mezcla Rápida	180	1,1	1,1	1,1	0,37
Floculador 1	9	2,45	2,45	2,5	1,45
Floculador 2	6	2,45	2,45	2,5	1,45
Floculador 3	3	2,45	2,45	2,5	1,45
Sedimentador	-	5	1,25	3,34	-

Además, el sedimentador laminar de esta planta trabaja con lamelas de perfiles rectangulares de dimensiones 8x15 centímetros con una profundidad de 1 metro. Utilizando las ecuaciones (1) a (18), se calcularon los parámetros propios a cada proceso.

Tabla 5. Parámetros calculados para la planta de Hualqui.

Parámetros de mezcla rápida			
Gradiente de velocidad (s^{-1})	833,6		
Tiempo de residencia (s)	67		
Número de Reynolds	414.719		
Parámetros de floculación			
Floculador	1	2	3
Gradiente de velocidad (s^{-1})	99,3	54,0	19,1
Tiempo de residencia (min)	12,5	12,5	12,5
Número de Reynolds	314.429	209.619	104.810
Parámetros de sedimentación			
Tiempo de residencia (min)	17		
Velocidad crítica de asentamiento (m/d)	59		
Carga superficial (m/d)	276,5		
Número de Reynolds	421		
Velocidad media horizontal (m/s)	414		

En las tablas 15 a 17 del anexo B se encuentran los demás parámetros calculados para estos equipos.

Se puede confirmar que estos equipos están correctamente diseñados para el caudal de 20 litros por segundo que reciben ya que todos los parámetros están dentro del rango de referencia definido a partir de la teoría. El único parámetro que se encuentra fuera del rango utilizado en este estudio corresponde al número de Reynolds del sedimentador, pero se puede aceptar ya que sigue estando dentro del rango máximo establecido por algunos textos teóricos de la bibliografía.

5.1.2. Floccodcantador compacto

Ahora, se realizó el trabajo inverso para determinar los valores de estos parámetros en condiciones de operación parecidas a las de la planta de Hualqui.

En las tablas siguientes se encuentran la información de diseño de estos equipos, obtenida en terreno, y los resultados de los criterios de operación.

Tabla 6. Información de diseño de flocodecantadores compactos.

Cámara	Ancho (m)	Largo (m)	Profundidad (m)	Diámetro del impulsor de agitador (m)	Dimensiones de lamelas del sedimentador (cm)
Mezcla Rápida	2,4	2	2,75	0,74	-
Floculación	2,4	2	2,75	0,74	-
Sedimentación	2,4	5	2,75	-	3x3

Tabla 7. Parámetros calculados para flocodecantadores compactos.

Parámetros de coagulación	
Velocidad angular del agitador (rpm)	207
Tiempo de residencia (s)	660
Número de Reynolds	1.891.078
Parámetros de floculación	
Tiempo de residencia (min)	11
Velocidad angular del agitador (rpm)	50,1 ($G = 99,3 s^{-1}$)
	33,4 ($G = 54,0 s^{-1}$)
	16,7 ($G = 19,1 s^{-1}$)
Número de Reynolds	457.781 ($G = 99,3 s^{-1}$)
	305.187 ($G = 54,0 s^{-1}$)
	152.594 ($G = 19,2 s^{-1}$)
Parámetros de sedimentación	
Tiempo de residencia (min)	34
Velocidad crítica de asentamiento (m/d)	9,7
Carga superficial (m/d)	125
Número de Reynolds	75
Velocidad media horizontal (m/s)	262

En las tablas 18 y 19 del anexo B se encuentran los demás parámetros calculados para estos equipos.

Comparando estos resultados con los rangos de referencia de las tablas 1 a 3, se observa claramente que la mayoría de estos valores se encuentran lejos de lo recomendado por la teoría.

Partiendo por la mezcla rápida, el tiempo de residencia en esta cámara es demasiado grande, siendo 6 veces mayor al valor máximo del rango de referencia y, en el mejor de los casos, es el doble del valor más grande encontrado en la investigación bibliográfica. Este exceso de detención en el estanque de coagulación se debe a que se tiene un volumen demasiado grande para el caudal al cual se requiere que estos equipos operen. Debido a esto, se estancan lodos en la primera cámara e, incluso, se generan flóculos en ella, lo cual es perjudicial para el proceso completo ya que, al comenzar a flocular antes, el tamaño de las partículas que llegan a las siguientes cámaras ya es considerable y, al tener una agitación intensa, estos flóculos se rompen antes de llegar al sedimentador. Además, los valores de la velocidad angular y del número de Reynolds son mayores que en la planta de Hualqui para el mismo gradiente de velocidad. Por lo tanto, si se generan flocs en esta etapa, éstos se fragmentan fácilmente.

Inversamente, el tiempo de residencia de la cámara de floculación es demasiado pequeño. Si se realiza la floculación en una sola cámara, en vez de segmentar el proceso, se necesita que el flujo se mantenga un tiempo lo suficientemente grande para que la mayor cantidad de partículas interactúen entre sí, ya sea por choque o por barrido. Adicionalmente, la velocidad angular del agitador va a ser mayor a la utilizada con un agitador de paletas, independiente del gradiente de velocidad, ya que se usa un agitador de hélice. Debido a esto, los flóculos que llegan al sedimentador son demasiado pequeños, es decir que la floculación tiene una eficiencia muy baja, y no logran sedimentar, por lo cual se observa un flujo con partículas suspendidas en la cámara de agua clarificada.

Finalmente, si se analizan los parámetros de la sedimentación, se tiene que están ligeramente por debajo de los rangos de referencia. Si bien esto no perjudica

al proceso en sí, es más, resulta en una alta eficiencia ya que la velocidad crítica de asentamiento tiene un valor muy bajo, la cámara se encuentra sobredimensionada ya que, como el equipo está construido en base a un contenedor de 40 pies, la longitud del sedimentador restringe la de otras cámaras, especialmente la cámara de floculación. Esta sobredimensión se observa especialmente en el tiempo de residencia, el cual es casi el doble de lo necesario según la teoría de sedimentadores laminares.

Por otra parte, se concluyó que la rampa que se encuentra entre la cámara de floculación y la de sedimentación representa un inconveniente para el proceso ya que, al generar un flujo ascendente en pendiente, se genera una sedimentación anticipada y, por lo tanto, se permite la concentración de lodos en el fondo de la cámara de floculación. Además, se necesita una distribución uniforme en todo el fondo del decantador para que cada perfil de las lamelas reciba la misma cantidad de agua que los otros (Arboleda, 2000).

5.2. Diseño preliminar del equipo

Para poder adecuar los parámetros del equipo compacto, se calcularon nuevas dimensiones de cada cámara con el objetivo de tener los mismos valores que para los equipos de la planta de Hualqui tomando en cuenta los diferentes criterios mencionados en la metodología. Se definió que la mejor opción para la mezcla rápida es que se realice en un estanque externo al floccodecantador debido al bajo volumen que se requiere; si se adecuaba esta cámara a las dimensiones de ancho y profundidad de los contenedores, se tendría un largo muy pequeño y no se podría instalar un agitador. Para evitar instalar baffles en el estanque de mezcla rápida, a fin de restringir el vórtice que se genera debido a la alta agitación del fluido, se utiliza un diseño cuadrado para este estanque de mezcla rápida. Además, se decidió eliminar la cámara que contiene la rampa entre el floculador y el sedimentador y rediseñar los espacios a fin de tener 3 cámaras de floculación. Para las lamelas, se utilizó el valor de 5 centímetros de espaciamiento entre perfiles

recomendado por bibliografía (Rincón et al., 2014). Los resultados de este nuevo diseño aparecen en la siguiente tabla.

Tabla 8. Resultados de diseño preliminar de flocodecantadores.

Cámara	Ancho (m)	Largo (m)	Profundidad (m)	Velocidad angular del agitador (rpm)	Profundidad lamelas (m)
Mezcla Rápida	1,06	1,06	1,19	272	-
Floculador 1	2,4	2,3	2,75	41	-
Floculador 2	2,4	2,3	2,75	27	-
Floculador 3	2,4	2,3	2,75	14	-
Sedimentador	2,4	3,2	2,75	-	0,5

En las tablas 20 y 21 del anexo B, se encuentran los demás parámetros calculados para este equipo.

Al sumar el largo de todas las cámaras (floculadores y sedimentador), incluyendo el largo de la cámara de agua clarificada, se obtiene un largo de 11 metros, quedando todavía 1 metro de contenedor libre. Si bien los tiempos de residencia de las cámaras de floculación y sedimentación están dentro de los rangos de referencia, siguen estando cerca del límite inferior de éstos, a excepción del valor de la velocidad crítica de asentamiento que, por el contrario, es cercano al límite superior. Por esta razón, se vuelve a estudiar el diseño para optimizar el proceso.

5.3. Análisis de sensibilidad

5.3.1. Tipo de agitador

En primer lugar, se estudiaron los diferentes tipos de agitadores para determinar el que entregara una menor velocidad de agitación ya que, para minimizar los esfuerzos sobre la transmisión, el eje y los puentes del agitador, éste debe girar lo más suavemente posible (Invent, 2017). Los resultados obtenidos tomando como base de cálculo un gradiente de velocidad de $99,3 \text{ s}^{-1}$ en la primera cámara del nuevo diseño del flocodecantador se presentan en el gráfico siguiente.

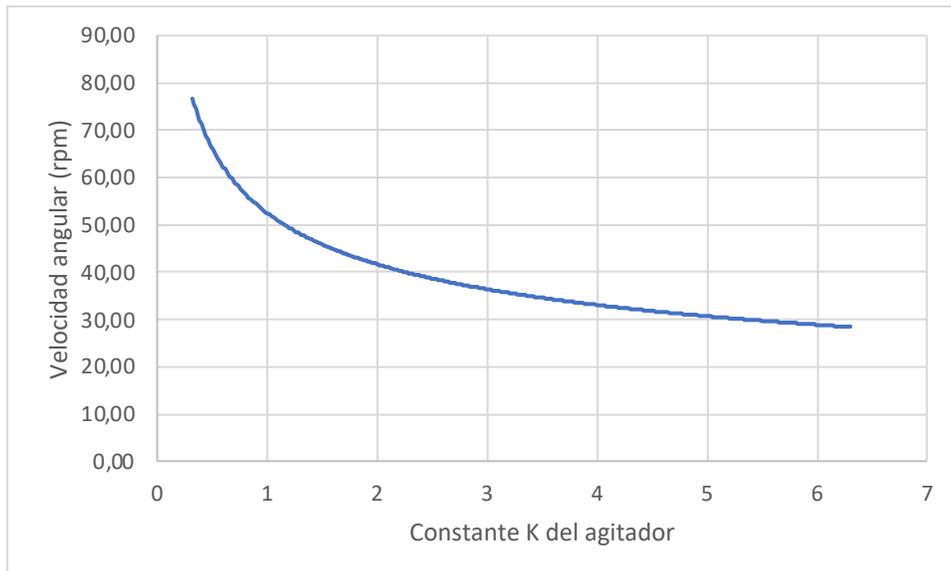


Figura 17. Efecto del tipo de agitador en la velocidad angular.

Como la curva observada es decreciente a medida que aumenta la constante K, la cual está directamente ligada con el tipo de agitador, se puede concluir que un agitador de turbina y 6 aletas planas corresponde a la mejor opción ya que presenta el mayor valor de esta constante, según la tabla 13 del anexo B.

Adicionalmente, se analizó la opción de utilizar un sistema de floculación de paletas de eje horizontal, cuyos resultados se informan en la tabla siguiente.

Tabla 9. Diseño de sistema de floculación de paletas

Área paletas (m ²)	Número de paletas	Largo de paletas (m)	Ancho de paletas (m)	Radio de giro (m)	Velocidad angular (rpm)	Potencia al eje (W)
1,32	2	1,2	0,55	0,72	14	456

Si bien, la velocidad angular es menor para un sistema de paletas que para cualquier otro tipo de agitador, la potencia requerida del motor es mayor ya que, si se toma una eficiencia del 70% y un coeficiente de pérdida por fricción de 1,35 para los demás agitadores, la potencia real de éstos tiene un valor de 251 W, casi la mitad que para el sistema de paletas, lo cual afecta el costo de operación de los equipos. Además, se debe tomar en cuenta el costo de construcción de las paletas ya que deben ser hechas a medida, a diferencia del agitador de turbina que puede ser adquirido comercialmente. Por lo tanto, la elección entre un agitador de turbina de 6 aletas planas y un sistema de paletas recae en un análisis económico de la opción más rentable, ya sea para comercializar el equipo compacto o para ser utilizado en plantas de tratamiento de la empresa Essbio. Para el estudio de diseño, se analizarán ambas opciones.

5.3.2. Diseño de lamelas

Para poder obtener un nuevo diseño del sedimentador, se tiene que primero estudiar el impacto que tienen el tipo de perfiles y las dimensiones de éstos en los parámetros de diseño del proceso. Con el objetivo de comparar los tipos de lamelas, se calcularon los tiempos de retención en los perfiles para placas paralelas, tubos circulares horizontales y ductos cuadrados. Como base de cálculo, se usaron los valores de 50 m/d para la velocidad crítica de asentamiento, 3 centímetros para la separación entre lamelas y una velocidad del flujo de 215 m/d , la cual corresponde a la velocidad en el sedimentador del floccodecantador existente. Además, los perfiles cuadrados y de placas paralelas tienen una inclinación de 60°. Los resultados se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 10. Resultados de análisis de la influencia del tipo de lamela en sedimentador.

Tipo de lamela	L_c	L'	L	l (m)	Tiempo de retención (min)
Placas paralelas	6,87	0,97	7,84	0,24	1,6
Tubos circulares	5,73	4,33	10,1	0,30	2,0
Ductos cuadrados	10,1	0,97	11,1	0,33	2,2

De acuerdo con los resultados, el mejor tipo de perfiles es el de ductos cuadrados ya que se tiene un mayor tiempo de retención del agua dentro de ellos, además que, como los tubos circulares se ubican generalmente de manera horizontal o con muy poca inclinación debido a su forma, se dificulta la entrada de agua a los espacios entre lamelas.

Una vez seleccionado el tipo de perfiles, se analizó el efecto de la separación entre las lamelas y del área superficial cubierta por los perfiles en los parámetros de velocidad crítica de asentamiento, número de Reynolds y longitud relativa L .

Para el primer caso, se mantuvo constante la profundidad de las placas en 0,9 metros en el diseño preexistente del sedimentador, es decir con un largo de 5 metros para esta cámara.

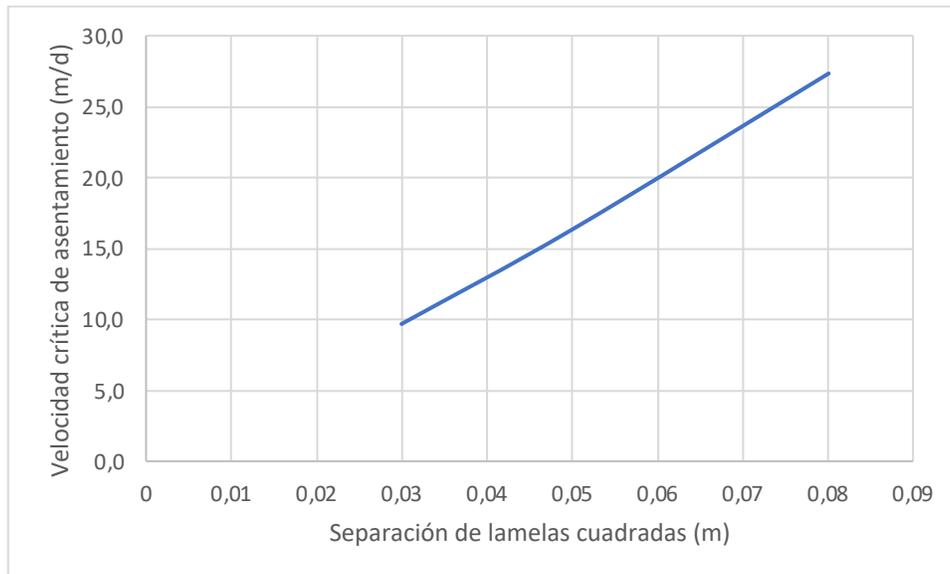


Figura 18. Efecto de la separación de las lamelas en la velocidad crítica de asentamiento.

Como se puede observar en el gráfico de la figura 18, la relación entre la velocidad v_{sc} y la separación de las lamelas es prácticamente lineal y proporcional. Además, según los gráficos de las figuras 36 y 37 del anexo C, el número de Reynolds igual tiene una relación de proporcionalidad mientras que con la longitud relativa ocurre el inverso.

Por otra parte, si se estudian los gráficos de las figuras 38 y 39 del anexo C, en donde se varía la profundidad de los perfiles manteniendo el espacio entre ellos de 3 centímetros, se tiene que esta variable presenta una relación opuesta con estos parámetros. Es decir, si se aumenta la profundidad, la velocidad crítica disminuye y se aumenta la longitud relativa, con un valor óptimo cuando la profundidad es 10 veces mayor al espacio entre lamelas. Por lo tanto, se debe encontrar un punto medio para ambas variables, el cual se definió como 5 centímetros para el espacio entre lamelas, lo cual es consistente con la recomendación de la bibliografía (Rincón, 2004), y de 60 centímetros para la profundidad de ellas. Además, se recomienda reemplazar el material de construcción de éstos por plástico, especialmente PVC, debido a su bajo peso y su manejabilidad, aparte de ser resistentes frente a la intensidad del retrolavado (Arboleda, 2000).

Ahora, para analizar cuál debería ser el valor del área superficial cubierta por estos perfiles, se mantuvieron constantes las variables determinadas anteriormente.

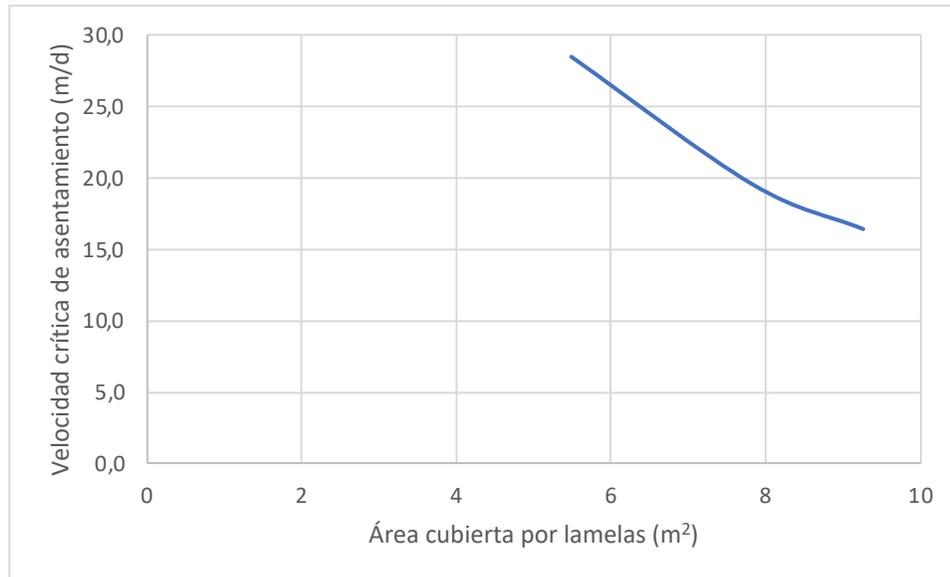


Figura 19. Efecto del área superficial cubierta por perfiles en la velocidad crítica de asentamiento.

De acuerdo con el gráfico de la figura 19 y al de la figura 40 del anexo C, tanto la velocidad crítica de asentamiento como el número de Reynolds tienen una relación inversamente proporcional con el área superficial, por lo cual esta variable debe tener un valor lo más grande posible para obtener resultados óptimos. Este resultado se utilizó para el siguiente análisis de sensibilidad.

5.3.3. Dimensiones de las cámaras de procesos

Como el tiempo de residencia es el único parámetro que se puede regular a partir del diseño para las cámaras de floculación, ya que el gradiente de velocidad se controla a través de la velocidad angular del agitador, se realizó un análisis en base al efecto del largo de estas cámaras en este indicador para varios caudales.

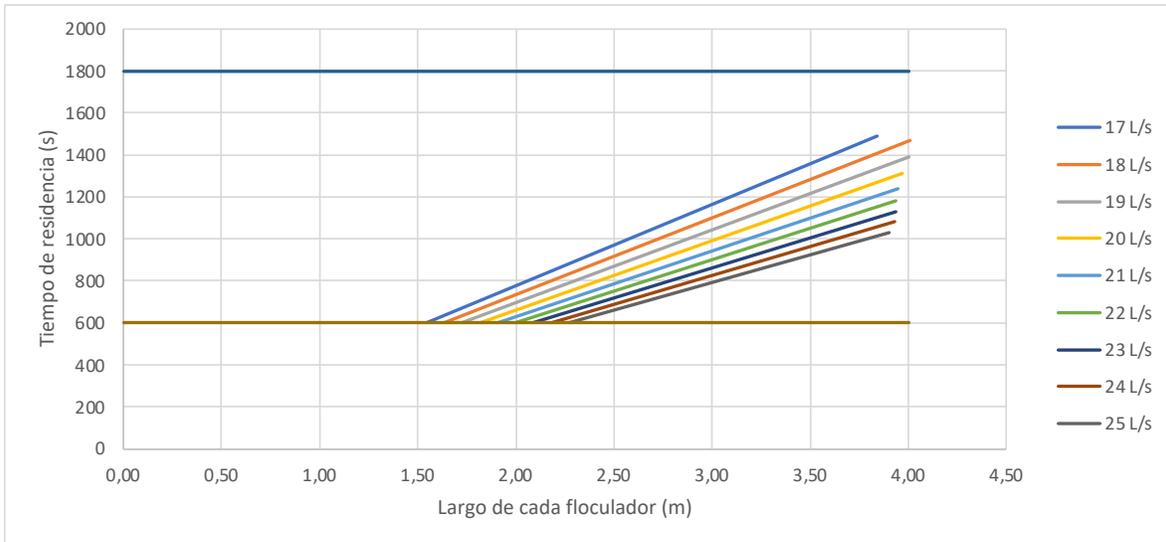


Figura 20. Tiempo de residencia en función del largo de las cámaras de floculación para diferentes caudales.

Del gráfico se desprende que, mientras mayor sea el volumen de cada cámara de floculación, mayor será el tiempo de residencia y, además, se puede tener una mayor variación del caudal que es capaz de procesar el equipo, siendo el largo mínimo de 1,7 metros para un caudal de 20 litros por segundo, en donde la curva de este caudal se encuentra con la recta horizontal del límite mínimo del rango de referencia.

Ahora, para el sedimentador, se utilizaron los resultados del análisis de lamelas para mantener esos valores constantes mientras se varía el largo de esta cámara. Como el área superficial de las placas debe ser lo mayor posible, se decidió que se mantendría el diseño inicial, en donde toda la superficie del sedimentador está cubierta por perfiles, a excepción de las canaletas centrales por donde se extrae el agua clarificada. Los parámetros observados corresponden a la velocidad crítica de asentamiento, la cual está graficada en la figura 21, el número de Reynolds, el tiempo de residencia en el equipo y la carga superficial, los cuales se encuentran graficados en las figuras 41 a 43 del anexo C, para diferentes caudales.

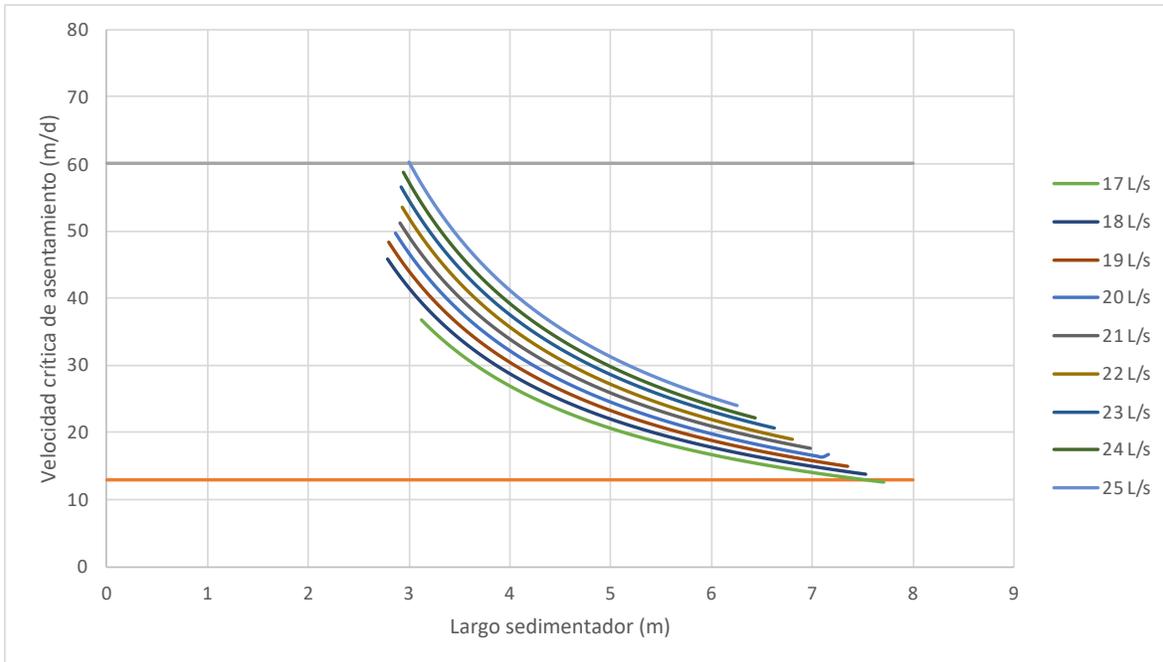


Figura 21. Velocidad crítica de asentamiento en función del largo de la cámara de sedimentación para diferentes caudales.

A partir de estos resultados, se puede observar que, si bien a mayor volumen de sedimentador, se tiene una velocidad crítica de asentamiento y un número de Reynolds menores, lo cual es lo buscado, también se tiene un tiempo de residencia mayor, así como también una carga superficial menor. Ahora bien, la variación de estos últimos parámetros no afecta al proceso en sí, pero puede ser un indicador de una sobredimensión del sedimentador ya que la eficiencia aumentaría a un nivel tan alto que no se justifica si el flujo pasará posteriormente a un filtro de arena. Por lo tanto, el largo óptimo del sedimentador, tomando en cuenta que se necesita espacio para las cámaras de floculación, se encuentra entre 3,5 y 4,5 metros. Para este estudio, se decidió un valor de 4 metros.

5.4. Diseño final del floccodecantador

Utilizando todos los estudios anteriores, se decidió proponer 2 diseños distintos de floccodecantadores compactos: uno que posea 2 cámaras de floculación

con gran dimensión y uno que posea 3 cámaras de floculación de tamaño un poco más reducido. Las dimensiones de cada equipo se presentan en las figuras 47 y 48 del anexo D y están resumidas en las siguientes tablas, así como también los parámetros de diseño de éstos. Además, en las tablas 23 a 25 del anexo B se encuentran las especificaciones de los agitadores de turbina y de paletas para los respectivos valores de gradiente de velocidad de cada equipo, así como también los valores de otros parámetros del sedimentador.

Tabla 11. Especificaciones del floccodcantador compacto con 2 cámaras de floculación.

Parámetros	Cámara de floculación 1	Cámara de floculación 2	Cámara de sedimentación	Cámara de agua clarificada	Equipo general
Ancho (m)	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Largo (m)	3,4	3,4	4,0	0,9	12
Profundidad (m)	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
Tiempo de residencia (min)	18,7	18,7	22,0	5,0	64,6
Gradiente de velocidad (s ⁻¹)	76,7	36,6	-	-	-
Número de Reynolds	272.079	166.144	160	-	-
Carga superficial (m/d)	-	-	180	-	-
Velocidad crítica de asentamiento (m/d)	-	-	32,1	-	-
Dimensiones de lamelas	-	-	5x5 cm	-	-
Profundidad de lamelas (m)	-	-	0,6	-	-

Tabla 12. Especificaciones del flocodecantador compacto con 3 cámaras de floculación.

Parámetros	Cámara de floculación 1	Cámara de floculación 2	Cámara de floculación 3	Cámara de sedimentación	Cámara de agua clarificada	Equipo general
Ancho (m)	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Largo (m)	2,3	2,3	2,3	4,0	0,8	12
Profundidad (m)	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
Tiempo de residencia (min)	12,7	12,7	12,7	22,0	5,0	64,6
Gradiente de velocidad (s^{-1})	99,3	54,1	19,1	-	-	-
Número de Reynolds	265.803	177.202	88.601	160	-	-
Carga superficial (m/d)	-	-	-	180	-	-
Velocidad crítica de asentamiento (m/d)	-	-	-	32,1	-	-
Dimensiones de lamelas	-	-	-	5x5 cm	-	-
Profundidad de lamelas (m)	-	-	-	0,6	-	-

Como el primer equipo posee un mayor tiempo de residencia en cada cámara de floculación, está diseñado para ser ocupado en ubicaciones en donde el caudal sea más variable. Por otra parte, el segundo diseño está diseñado para fuentes de agua que vengan con una turbiedad baja ya que, al tener una baja cantidad de partículas suspendidas, el proceso de floculación debe ser impulsado por el choque entre ellas, el cual se genera a altos gradientes en estos casos. Al tener 3 cámaras de floculación, se puede generar una variación del gradiente de

velocidad partiendo por uno considerablemente alto en la primera cámara hasta llegar a uno más bajo en la última, logrando así una mayor eficiencia del proceso ya que los flóculos formados no se mantendrán un tiempo excesivo en la primera cámara, lo cual puede provocar la ruptura de estas partículas.

El efecto de la variación del caudal en el parámetro de tiempo de residencia se graficó en las figuras 22 a 24 para poder obtener el rango de operación de estos equipos. Además, para el sedimentador, se estudió la variación del número de Reynolds, de la carga superficial y de la velocidad crítica de asentamiento en función del caudal de operación, lo cual se encuentra graficado en las figuras 44 a 46 del anexo C.

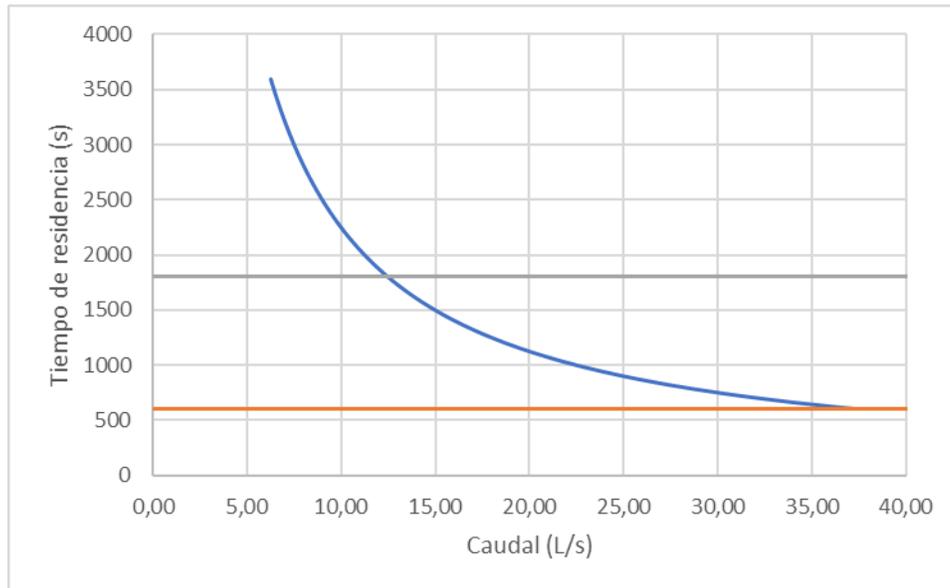


Figura 22. Tiempo de residencia del flujo en una cámara de floculación de 3,4 metros de largo del floccodcantador compacto en función del caudal.

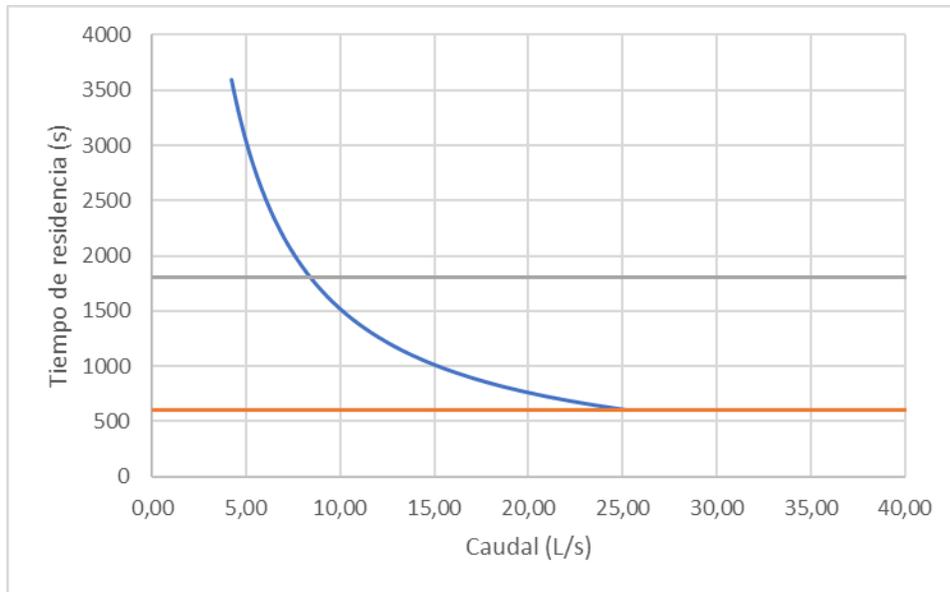


Figura 23. Tiempo de residencia del flujo en una cámara de floculación 2,3 metros de largo del floccodecantador compacto en función del caudal.

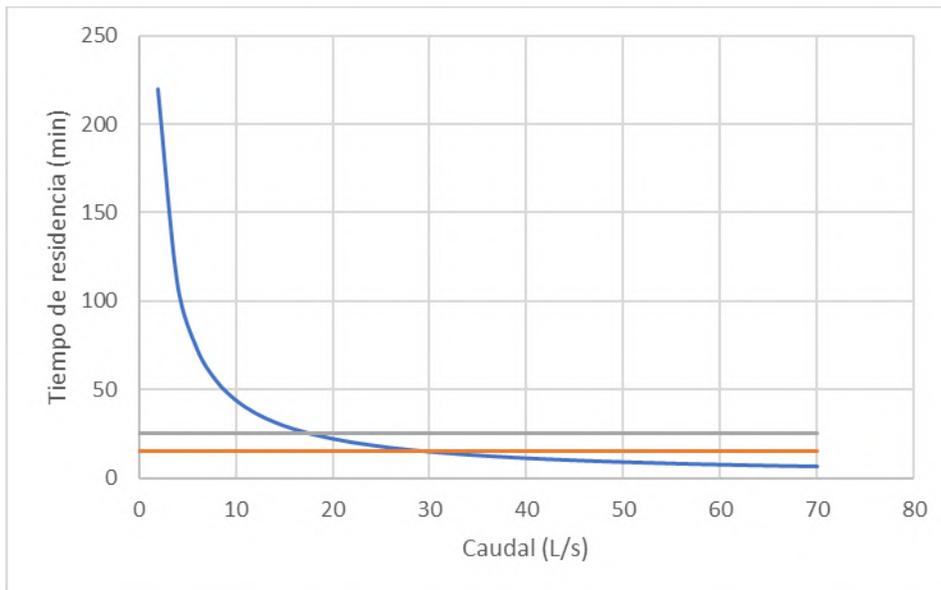


Figura 24. Tiempo de residencia del flujo en una cámara de sedimentación en función del caudal.

De acuerdo con lo observado en los gráficos, la variación del caudal para el equipo de 2 cámaras de floculación está restringida por los tiempos de residencia

tanto de la cámara de floculación como del sedimentador. Según esto, el caudal de operación para este equipo puede estar en un rango de 13 a 30 litros por segundo, con un caudal óptimo de 20 L/s. Para el equipo de 3 cámaras de floculación, como la cámara de sedimentación es igual que para el equipo anterior, la variación del caudal está restringida por la cámara de floculación, siendo el máximo de 25 litros por segundo.

Adicionalmente, se observa que la variación de los parámetros propios de cada proceso no se ve gravemente afectada con la variación del caudal, por lo tanto, no se genera una gran diferencia de eficiencia al cambiar el caudal de operación.

5.5. Mejoras adicionales del floccodcantador

Aparte del diseño general, existen algunas mejoras que se pueden realizar a los equipos compactos para mejorar el desarrollo del proceso.

En el caso del estanque de mezcla rápida, si se quiere eliminar el vórtice generado por la agitación, el cual puede disminuir la efectividad de la mezcla, se instalan 4 baffles o pantallas de un ancho igual a $\frac{1}{10}$ del diámetro equivalente del estanque, las cuales impiden el movimiento másico rotatorio y promueven la mezcla vertical (Romero, 1999).

Para agitadores de turbina, el espacio entre el impulsor y el fondo del estanque debería estar entre 0,27 y 0,33 veces la profundidad del equipo (He, Xie, Zhao, Huang & Pan, 2019). Esto se debe a que, para evitar la sedimentación en las cámaras de mezcla rápida y floculación, la potencia debe ser suministrada en la sección inferior de ellas. Por lo tanto, el impulsor del agitador debe estar lo más cerca del suelo posible.

A pesar de que tanto el agitador de turbina como el sistema de paletas representan buenas opciones para la generación del gradiente de velocidad en el floccodcantador, se puede mejorar la eficiencia de este proceso utilizando agitadores hiperbólicos, los cuales están representados en la figura 52 del anexo E.

Estos equipos operan al fondo del estanque generando un flujo descendiente del agua para luego expulsarlo de manera horizontal a través de unas paletas curvas diseñadas para agitar el mayor volumen posible de fluido y para minimizar los esfuerzos cortantes que provocan la ruptura de los flóculos (DBS Manufacturing, 2016). La principal ventaja de estos tipos de mezcladores es que, al estar ubicadas las paletas en el fondo del estanque, se evita la sedimentación en esta cámara ya que genera mayor turbulencia en esta zona, resuspendiendo así las partículas de lodo. Además, el flujo en forma de toroide permite una alta homogenización del flujo y, por lo tanto, un excelente mezclado (Invent, 2017). En el ámbito económico, también representan una ventaja operacional ya que el costo de la energía que ocupan corresponde aproximadamente a un valor 25% menor que el consumido por agitadores tradicionales (Akela, Fenton & Lacson, 2019). Sin embargo, el problema de estos agitadores es que siguen siendo nuevas tecnologías, por lo cual su costo puede exceder las ventajas que presentan, sobre todo si el objetivo es comercializar el equipo. Por lo tanto, para analizar esta opción, se debe realizar un estudio económico que compare el costo con las ventajas mencionadas anteriormente.

Para la separación entre las cámaras de floculación, se recomienda que permitan velocidades de 0,2 a 0,3 m/s, con el fin de impedir el flujo en sentido opuesto, lo cual provoca que las masas de agua se entremezclen. Generalmente, estos orificios se ubican de forma uniforme a lo largo de las paredes en formas rectangulares o circulares (Baque, 2001). La distribución se presenta en la figura 50 del anexo E, en donde se consideraron 20 orificios de 2 cm de diámetro cada uno, a través de los cuales pasa un flujo a una velocidad de 0,25 m/s.

De igual manera, para la separación entre la cámara final de floculación y la cámara de sedimentación, se recomienda un gran número de orificios pequeños que permitan una velocidad de entrada menor a 0,15 m/s y que estén dispuestos de manera que los más altos se ubiquen a una distancia de la superficie que se encuentre entre $\frac{1}{5}$ y $\frac{1}{6}$ del valor de la profundidad del equipo. Esto se establece de esta manera para evitar que el agua se desplace horizontalmente por debajo de las placas en vez de que entre por el fondo de la cámara (Arboleda, 2000). Además,

al tener un mayor número de agujeros de entrada, se elimina la posibilidad de tener zonas muertas debajo de las placas (Blanco, 2004). Para esto, la distribución se presenta en la figura 51 del anexo E y se consideraron 30 orificios de 2 centímetros de diámetro cada uno, a través de los cuales pasa un flujo a una velocidad de 0,1 m/s.

Además, para esta cámara, se recomienda que la tolva tenga una inclinación mayor a 35° , con la finalidad de que los lodos se deslicen más fácilmente y logren compactarse de mejor manera aumentando el nivel de concentración de ellos en este espacio. La remoción de estos lodos debería realizarse de manera gravitacional para evitar que se mantenga un porcentaje de ellos en el fondo, lo cual ocurre en el diseño existente ya que el retiro se lleva a cabo horizontalmente utilizando una línea ubicada a cierta altura de la tolva que se conecta con una bomba (Blanco, 2004).

6. Conclusiones

Al realizar una comparación entre las condiciones de operación de los equipos compactos en la Planta El Roble y de los equipos construidos en la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Hualqui, se deduce claramente que los primeros poseen un diseño que impide la correcta realización del proceso requerido.

Los principales problemas se encuentran en la cámara de mezcla rápida, la cual no puede estar contenida dentro del espacio del equipo debido a que se obtendría un volumen demasiado grande. Esto conlleva a una sedimentación de lodos en esta cámara por el excesivo tiempo de residencia que se tiene. Debido a esto, la mejor opción para llevar a cabo la coagulación es ya sea que el equipo corresponda a un estanque cuadrado externo de 1,06x1,06 metros y una profundidad de 1,19 metros o que se utilice un mezclador en línea, dependiendo de los costos de construcción y de operación que conlleve cada opción.

Además, el equipo compacto cuenta con una rampa antes de la cámara de sedimentación que genera un estancamiento de lodos en el fondo del floculador, por lo cual se decidió eliminarla y redistribuir los espacios para tener varias cámaras de floculación aumentando igualmente el volumen de éstas en comparación con la existente con el objetivo de aumentar la eficiencia del proceso en general.

A partir de esta redistribución, se generaron 2 diseños distintos de floccodcantadores compactos: uno con 2 cámaras de floculación, cada una con un largo de 3,4 metros, y uno con 3 cámaras de floculación, cada una con un largo de 2,3 metros. Cada diseño tiene una función distinta ya que el primero es recomendado para fuentes de agua que presenten una turbiedad alta o variable dependiendo de la época del año, como es el caso de las fuentes superficiales y, en específico, de la planta El Roble, y que permitan una variación más amplia del caudal de operación, mientras que el segundo diseño es preferible para ser utilizado con turbiedades de entrada bajas y un caudal fijo alrededor de 20 L/s.

Para ambos diseños, la cámara de sedimentación posee un largo de 4 metros y se recomienda utilizar perfiles cuadrados de PVC de 5x5 centímetros con una profundidad de 0,6 metros. Además, la tolva en donde se depositan los lodos debería tener, como mínimo, una inclinación de 30° para aumentar la compactación de éstos y luego retirarlos de forma gravitacional por el fondo.

Con el objetivo de evitar el flujo en sentido contrario, las paredes entre las cámaras de floculación deben tener una distribución de 20 orificios de salida de 2 cm de diámetro cada uno y las paredes entre el compartimiento de floculación final y la cámara de sedimentación, una de 30 orificios de salida de 2 cm de diámetro cada uno.

Para la agitación del fluido, en base a la eficiencia del proceso, se recomienda el uso de agitadores hiperbólicos. Sin embargo, al tratarse de tecnología que aún presenta un costo elevado, es preferible considerar las opciones de un agitador mecánico de turbina o un sistema de paletas, dependiendo de los costos asociados a ellos.

Por lo tanto, para determinar el equipo adecuado para las necesidades de operación o comercialización, se deben realizar adicionalmente un análisis de la fuente de agua y un análisis económico.

7. Referencias

- Akela, A., Fenton, C. & Lacson, A. (2019). High Efficiency Mixer Aerators Save Silicon Valley Clean Water Big Money. *California Water Environment Association [CWEA]*. Recuperado 13 de diciembre de 2022, a partir de <https://www.cwea.org/news/high-efficiency-mixer-aerators-save-silicon-valley-clean-water-big-money/>
- Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua* (3ª Edición). McGraw-Hill Interamericana, S.A.
- Baque, M. (2001). *Diseño de un Sistema de Floculación de Paletas Giratorias para una Planta de Potabilización de Agua*. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.
- Barrenechea, A. (2004). *Aspectos Fisicoquímicos de la Calidad del Agua*. (Vol.1).
- Blanco, C. (2004). *Diseño de un sedimentador de placa paralela con flujo horizontal bajo el concepto de la tasa de desbordamiento superficial*. Tesis de Grado. Área de Recursos Hídricos, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Colombia.
- Castillo, V. (2013). *Diseño y cálculo de un agitador de fluidos*. Seminario de Titulación. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Bío-Bío, Chile.
- DBS Manufacturing. (2016). *Hyperbolic Mixer*. [Ficha Técnica].
- Fan, L., Xu, N., Ke, X. & Shi, H. (2007). Numerical simulation of secondary sedimentation tank for urban wastewater. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*, 38, 425-433.
- Ghawi, A. (2018). Optimal design parameters for hydraulic vertical flocculation in the package surface water treatment plant. *Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences*, 27, 438-451.
- Guerrero, T., Salazar, J. & Paredes, J. (2018). Eficiencia de un sedimentador laminar y convencional para eliminar sólidos. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 84, 336-349.

- He, W., Xie, Z., Zhao, Z., Huang, M. & Pan, M. (2019). Effects of impeller clearance on floc growth behaviors in a baffled square stirre-tank reactor: Flocculation-test and CFD-aided studies. *Separation and Purification Technology*, 212, 233-244.
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2021). *Censos de Población y Vivienda, Proyecciones de Población*. Recuperado 13 de diciembre de 2022, a partir de https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2021&idcom=8106
- Invent. (2017) *Agitador HYPERCLASSIC* [Ficha Técnica].
- Lanshen Group. (2019). *SQJB Hyerboloid Mixer* [Fotografía]. Recuperado 13 de diciembre de 2022, a partir de <https://en.lanshengroup.com/product/sqjb-hyperboloid-mixer/>.
- Mott, R. (2006). *Mecánica de Fluidos* (6ª Edición). Pearson Educación.
- Norma Chilena 409 de 2006. [Ministerio de Salud de Chile]. Norma de Calidad del Agua Potable. 27 de junio de 2006.
- Obando, J. & Uribe, E. (2021). *Diseño constructivo de la planta piloto de potabilización para el Laboratorio de Procesos Fisicoquímicos*. Memoria de Título. Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental de Medellín, Colombia.
- Organización Mundial de la Salud. (2022). *Agua para consumo humano*. Recuperado 14 de diciembre de 2022, a partir de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Placencia, F. (2020). Lota: Embalse Colcura robustece servicio de agua potable. *Diario Concepción*. Recuperado 13 de diciembre de 2022, a partir de <https://www.diarioconcepcion.cl/economia/2020/10/02/lota-embalse-colcura-robustece-servicio-de-agua-potable.html>
- Resolución 4.423 de 2016 [Superintendencia de Servicios Sanitarios]. Deja sin efecto Res. SISS N° 3.603/09 y aprueba nuevo instructivo de “Control de Calidad de Fuentes de Agua Potable”. 12 de diciembre de 2016.
- Rincón, A., Herrera, O.F. & Ortiz, M.F. (2014) Esquema para el dimensionamiento de unidades de sedimentación de alta tasa de flujo ascendente. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 16, 29-40.

- Romero, J. (1999). *Potabilización del Agua* (3ª Edición). Alfaomega Grupo Editor, S.A..
- Syifaul, F., Ayu, R. & Ratnaningsih, R. (2020). Selection of design criteria for the coagulation, flocculation and sedimentation unit in the Klapanunggal drinking water treatment plant. *International Journal of Science & Technology Research*, 9, 3.500-3.505.
- Toledo, P., More, J. & Alvial, I. (2017). *Agua y Salud*. Recuperado 13 de diciembre de 2022, a partir de <https://www.iniciativamilenio.cl/wp-content/uploads/2018/03/Documento-extenso-agua-y-salud.pdf>
- Valenzuela, I. (2019). La próxima semana comienza fiscalización en Essbio y Aguas San Pedro [Fotografía]. *Diario Concepción*. Recuperado 13 de diciembre de 2022, a partir de <https://www.diarioconcepcion.cl/ciudad/2019/07/20/la-proxima-semana-comienza-fiscalizacion-en-essbio-y-aguas-san-pedro.html>
- Weber, W. (1979). *Control de la calidad del agua: Procesos Físicoquímicos*. Editorial Reverté, S.A.

Anexos

Anexo A – Visitas a terreno

A.1. Planta de Hualqui

La Planta de tratamiento de agua potable de Hualqui procesa el flujo de entrada a través de un sistema de coagulación, floculación y sedimentación para luego terminar con una filtración con arena y la desinfección con cloro. Para realizar este tratamiento, la planta consta con un estanque mecánico de mezcla rápida, 3 floculadores con agitadores de paletas, un sedimentador laminar y 3 filtros de arena.



Figura 25. Vista general de la planta de Hualqui.



Figura 26. Estanque de floculación de planta de Hualqui.



Figura 27. Sedimentador laminar de la planta de Hualqui.



Figura 28. Filtros de arena de la planta de Hualqui.

A.2. Floccodecantadores

Como se puede observar en el croquis de la figura 13, los floccodecantadores existentes constan de una cámara de mezcla rápida y una cámara de floculación, ambas provistas de un agitador mecánico rodeado por una pared de forma tubular, seguidas por una rampa que guía el fluido hacia la cámara de sedimentación, la cual cuenta con unos canales en la superficie para llevar el agua hasta una cámara final desde donde se retira del equipo.



Figura 29. Vista lateral de la entrada del agua al floccodecantador compacto.

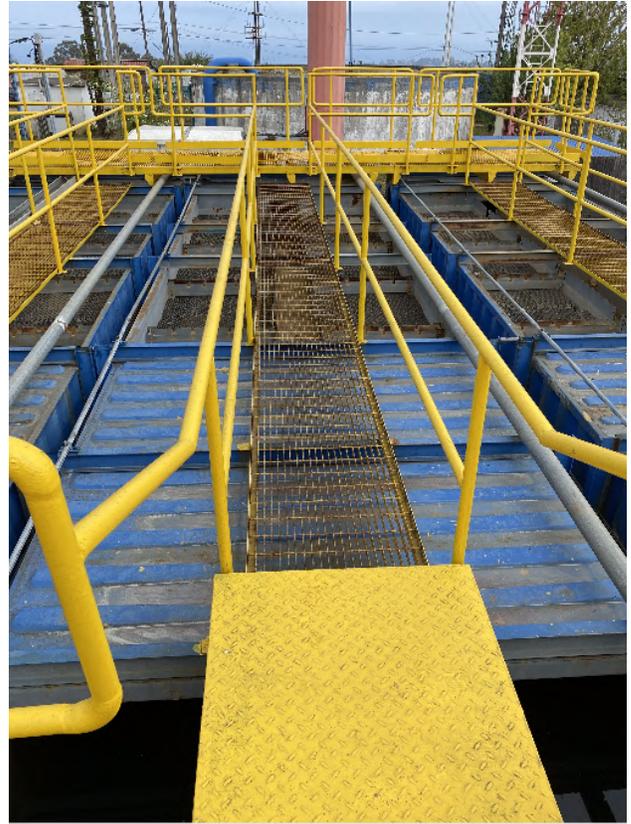


Figura 30. Vista superior del floccodecantador compacto desde cámara de floculación hacia cámara de sedimentación.



Figura 31. Sedimentador laminar del floccodecantador compacto.



Figura 32. Vista hacia la cámara de agua clarificada del floccodecantador compacto.



Figura 33. Cañerías de extracción de agua clarificada (izquierda) y de extracción de lodos (derecha) de floccodecantador compacto.

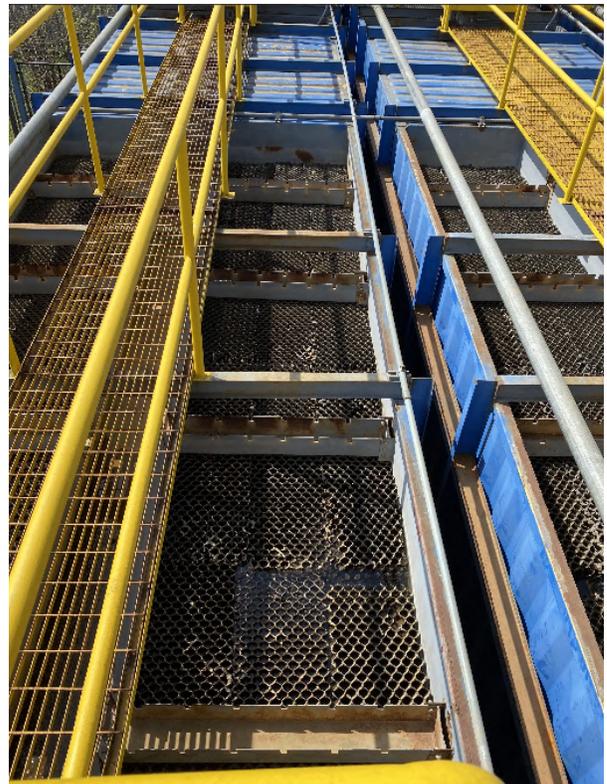


Figura 34. Vista desde la cámara de sedimentación hasta la cámara de floculación del floccodecantador compacto.



Figura 35. Lamelas de la cámara de sedimentación del floccodecantador compacto.

Anexo B – Memorias de cálculo

B.1. Parámetros de la planta de Hualqui

Utilizando la información de la tabla 4 rescatada a partir de la visita a terreno de la planta de Hualqui, se determinaron los parámetros de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación para el caudal de operación de 20 litros por segundo que tratan estas instalaciones.

Para la coagulación, se tiene una velocidad angular de 180 rpm por un agitador de turbina y 6 paletas curvas que posee un impulsor de 0,37 metros de diámetro en un estanque de cúbico de 1,1 metros de largo, ancho y profundidad. A partir de esta información, se puede calcular el tiempo de residencia, el número de Reynolds y la potencia entregada al agua por el agitador.

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{(1,1 \text{ m})^3}{\left(20 \frac{\text{L}}{\text{s}}\right) \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}} = 66,6 \text{ s}$$

$$N_{RE} = \frac{\rho N d^2}{\mu} = \frac{\left(997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot (3 \text{ rps}) \cdot (0,37 \text{ m})^2}{10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 414.719$$

$$P = K \rho N^3 d^5 = 6,30 \cdot \left(997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot (3 \text{ rps})^3 \cdot (0,37 \text{ m})^5 = 925 \text{ W}$$

$$P_{real} = \frac{P \cdot C_f}{\varepsilon} = \frac{(925 \text{ W}) \cdot 1,35}{0,7} = 1.784 \text{ W}$$

El valor de la constante K se obtiene a partir de la siguiente tabla.

Tabla 13. Valores del parámetro K dependiendo del tipo de agitador mecánico (Romero, 1999).

Impulsor	K
Hélice, pitch cuadrado, 3 aletas	0,32
Hélice, pitch = 2, 3 aletas	1,00
Turbina, 6 aletas planas	6,30
Turbina, 6 aletas curvas	4,80
Turbina ventilador, 6 aletas	1,65
Turbina 6 aletas punta de flecha	4,00
Turbina, paletas planas, 2 paletas	1,70
Turbina de impulsor encerrado, 6 aletas curvas	1,08
Turbina de impulsor encerrado con estator (sin baffles)	1,12

Una vez obtenida la potencia entregada, se calcula el valor del gradiente de velocidad.

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} = \sqrt{\frac{925 \text{ W}}{\left(10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}\right) \cdot (1,1 \text{ m})^3}} = 833,6 \text{ s}^{-1}$$

Para la primera cámara de floculación, se reportó una velocidad angular de 9 rpm por un agitador de paletas que consta de 2 paletas cuya área transversal corresponde a un 20% del área transversal del equipo y cuyo radio de giro es de 0,73 metros en un estanque cuadrado de 2,45 metros de largo y ancho y de 2,5 metros de profundidad. Utilizando esta información, se puede determinar el tiempo de residencia, el número de Reynolds, la velocidad de giro de las paletas, la velocidad de las paletas, la potencia entregada al fluido y el gradiente de velocidad.

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{(2,45 \text{ m})^2 \cdot (2,5 \text{ m})}{\left(20 \frac{\text{L}}{\text{s}}\right) \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}} = 750 \text{ s} = 12,5 \text{ min}$$

$$N_{RE} = \frac{\rho N d^2}{\mu} = \frac{\left(997 \frac{kg}{m^3}\right) \cdot (0,15 rps) \cdot (1,46 m)^2}{10^{-3} \frac{kg}{m \cdot s}} = 314.429$$

$$v_p = 2\pi NR = 2\pi \cdot (0,15 rps) \cdot (0,73 m) = 41,3 \frac{m}{s}$$

$$v_g = 0,75v_p = 0,75 \cdot \left(41,3 \frac{m}{s}\right) = 31,0 \frac{m}{s}$$

$$P = \frac{C_d \cdot \rho \cdot A \cdot v_g^3}{2} = \frac{1,3 \cdot \left(997 \frac{kg}{m^3}\right) \cdot 0,2 \cdot (2,45 m) \cdot (2,5 m) \cdot \left(31,0 \frac{m}{s}\right)^3}{2} = 148 W$$

El valor de la constante C_d se obtiene a partir de la tabla 22 de este anexo.

$$P_{eje} = 3,5P = 3,5 \cdot (148 W) = 518 W$$

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} = \sqrt{\frac{148 W}{\left(10^{-3} \frac{kg}{m \cdot s}\right) \cdot (2,45 m)^2 \cdot (2,5 m)}} = 99,3 s^{-1}$$

Para la segunda y la tercera cámara de floculación, como tienen las mismas dimensiones que la primera, el cálculo es igual, a excepción de la velocidad angular cuyo valor se reemplaza por 0,1 rps y 0,05 rps, respectivamente.

Finalmente, el sedimentador laminar consiste en un estanque rectangular de 5 metros de largo por 1,25 metros de ancho con una profundidad de 3,34 metros y consta de unos perfiles rectangulares de 8x15 centímetros con una profundidad de 1 metros. En base a esto, se calcularon los parámetros de tiempo de residencia, velocidad media horizontal, carga superficial del equipo, la velocidad promedio del agua en las lamelas y el número de Reynolds.

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{(5 m) \cdot (1,25 m) \cdot (3,34 m)}{\left(20 \frac{L}{s}\right) \cdot \frac{1 m^3}{1000 L} \cdot \frac{60 s}{1 min}} = 17 min$$

$$v_h = \frac{Q}{A_t} = \frac{\left(20 \frac{L}{s}\right) \cdot \frac{1 m^3}{1000 L}}{(1,25 m) \cdot (3,34 m)} = 4,8 \cdot 10^{-3} \frac{m}{s} = 414 \frac{m}{d}$$

$$CS = \frac{Q}{A} = \frac{\left(20 \frac{L}{s}\right) \cdot \frac{1 m^3}{1000 L} \cdot \frac{3.600 s}{1 h} \cdot \frac{24 h}{1 día}}{(5 m) \cdot (1,25 m)} = 276 \frac{m}{d}$$

$$v_o = \frac{Q}{A \cdot \text{sen}\theta} = \frac{\left(20 \frac{L}{s}\right) \cdot \frac{1 m^3}{1000 L} \cdot \frac{3.600 s}{1 h} \cdot \frac{24 h}{1 día}}{(5 m) \cdot (1,25 m) \cdot \text{sen}(60^\circ)} = 456 \frac{m}{d}$$

Ahora, para determinar el parámetro de velocidad crítica de asentamiento, se considera el valor del parámetro S_c para conductos cuadrados de la tabla 14 con una separación e entre placas de 8 centímetros.

Tabla 14. Valores del parámetro S_c (Romero, 1999).

Tipo de perfiles	S_c
Placas Paralelas	1,0
Tubos Circulares	4/3
Conductos Cuadrados	11/8

A partir de estos valores, se pueden calcular el número de Reynolds, el tiempo de retención en las lamelas, las longitudes relativas del sedimentador y la velocidad v_{sc} .

$$N_{RE} = \frac{v_o e}{\nu} = \frac{\left(456 \frac{m}{d}\right) \cdot (0,08 m)}{10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 421$$

$$L = \frac{l}{e} = \frac{1,0 m}{\cos(60^\circ) \cdot (0,08 m)} = 25$$

$$L' = 0,013 N_{RE} = 0,013 \cdot 421 = 5,0$$

$$L_c = L - L' = 25 - 5 = 20$$

$$v_{sc} = \frac{S_c v_o}{\text{sen}\theta + L_c \cdot \cos\theta} = \frac{\frac{11}{8} \cdot \left(456 \frac{m}{d}\right)}{\text{sen}(60^\circ) + 20 \cdot \cos(60^\circ)} = 59 \frac{m}{d}$$

$$t_p = \frac{l}{v_o} = \frac{1,0 m}{\left(456 \frac{m}{d}\right) \cdot \left(\frac{1 d}{1.440 \text{ min}}\right)} = 6,3 \text{ min}$$

Todos estos resultados se encuentran resumidos en las tablas 15 a 17.

Tabla 15. Resultados de cálculos de parámetros de la mezcla rápida en la planta de Hualqui.

Gradiente de velocidad (s^{-1})	834
Diámetro del impulsor del agitador (m)	0,37
Tipo de agitador	Turbina y 6 paletas curvas
Velocidad angular (rpm)	180
Potencia entregada al fluido (kW)	0,93
Potencia real del motor (kW)	1,78
Tiempo de residencia (s)	67
Número de Reynolds	414.719

Tabla 16. Resultados de cálculos de parámetros de floculación en la planta de Hualqui.

Cámara de floculación	1	2	3
Gradiente de velocidad (s^{-1})	99,3	54,1	20
Número de paletas	2	2	2
Radio de giro (m)	0,73	0,73	0,73
Velocidad de giro (m/s)	31,0	20,6	10,6
Velocidad de paletas (m/s)	41,3	27,5	14,1
Velocidad angular (rpm)	9,0	6,0	3,0
Potencia entregada al fluido (W)	148	43,8	5,48
Potencia en el eje (W)	518	153	19,2
Tiempo de residencia (min)	12,5	12,5	12,5
Número de Reynolds	314.429	209.619	104.810

Tabla 17. Resultados de cálculos de parámetros de sedimentación en la planta de Hualqui.

Tipo de lamelas	Perfiles rectangulares
Dimensiones de lamelas	8x15 cm
Profundidad de lamelas (m)	1,0
Tiempo de residencia (min)	17
Tiempo de retención en lamelas (min)	6,3
Carga superficial (m/d)	276
Velocidad crítica de asentamiento (m/d)	59,0
Número de Reynolds	421
Velocidad media en lamelas v_o (m/d)	456
Longitud relativa L	25,0
Longitud relativa L'	5,0
L_c	19,6
Área superficial cubierta por lamelas (m ²)	4,38
Velocidad horizontal del flujo (m/d)	414

B.2. Parámetros de floccodecantadores existentes

El cálculo de los parámetros de diseño de los floccodecantadores compactos se llevó a cabo de la misma forma que para la planta de Hualqui, utilizando la información de la tabla 6, con la diferencia de que tanto en la cámara de mezcla rápida como en la de floculación se tomaron en cuenta agitadores de tipo hélice, pitch igual a 2 y 3 aletas. Los resultados de estos cálculos se resumen en las tablas 18 y 19.

Tabla 18. Resultados de cálculos de parámetros de coagulación y de floculación para los flocculadores compactos.

Cámara	Mezcla rápida	Floculación 1	Floculación 2	Floculación 3
Gradiente de velocidad (s^{-1})	834	99,3	54,1	19,1
Diámetro del impulsor del agitador (m)	0,74	0,74	0,74	0,74
Tipo de agitador	Hélice, pitch = 2 y 3 aletas			
Velocidad angular (rpm)	207	50,1	33,4	16,7
Potencia entregada al fluido (W)	9.174	130	38,6	4,82
Potencia real del motor (W)	17.692	251	74,4	9,30
Tiempo de residencia (s)	660	660	660	660
Número de Reynolds	1.891.078	457.781	305.187	152.594

Tabla 19. Resultados de cálculos de parámetros de sedimentación para los flocculadores compactos.

Tipo de lamelas	Perfiles cuadrados
Dimensiones de lamelas	3x3 cm
Profundidad de lamelas (m)	0,9
Tiempo de residencia (min)	34
Tiempo de retención en lamelas (min)	12
Carga superficial (m/d)	125
Velocidad crítica de asentamiento (m/d)	9,7
Número de Reynolds	75
Velocidad media en lamelas v_o (m/d)	215
Longitud relativa L	60
Longitud relativa L'	1,0
L_c	59
Área superficial cubierta por lamelas (m^2)	9,27
Velocidad horizontal del flujo (m/d)	262

B.3. Diseño preliminar del floccodecantador

Para obtener un diseño de los floccodecantadores que posea parámetros de diseño de los procesos que se llevan a cabo, se utilizaron los valores de los parámetros obtenidos en la planta de Hualqui.

Con el fin de poder generar una coagulación eficiente, se optó por analizar un estanque cuadrado externo al floccodecantador para este tratamiento. En primer lugar, utilizando el tiempo de residencia, se calcula el volumen necesario para el estanque.

$$V = Q \cdot t = \left(20 \frac{L}{s}\right) \cdot \left(\frac{1 m^3}{1.000 L}\right) \cdot (66,6 s) = 1,33 m^3$$

De ahí, se utilizó la relación que establece que el cociente entre la altura del estanque y su diámetro equivalente es igual a 1 junto con la fórmula del volumen de un cilindro, para determinar la profundidad del equipo.

$$V = \frac{\pi}{4} h D^2 = \frac{\pi}{4} h^3$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{4V}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot (1,33 m^3)}{\pi}} = 1,19 m$$

Luego, como es un estanque cuadrado, el ancho y el largo tienen el mismo valor, por lo cual se calcula con la siguiente ecuación.

$$Largo = Ancho = \sqrt{\frac{V}{h}} = \sqrt{\frac{1,33}{1,19}} = 1,06 m$$

Para el diámetro del impulsor del agitador, se utilizó la relación entre el diámetro de éste y el diámetro equivalente del equipo, la cual debe ser aproximadamente de 1:3.

$$d = \frac{D}{3} = \frac{h}{3} = 0,4 m$$

A partir de estos resultados, se calculan el número de Reynolds, la potencia entregada al fluido, la potencia real del motor del agitador y la velocidad angular.

$$P = G^2 \cdot \mu \cdot V = (833,6 \text{ s}^{-1}) \cdot \left(10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}\right) \cdot (1,33 \text{ m}^3) = 925 \text{ W}$$

$$P_{real} = \frac{P \cdot C_f}{\varepsilon} = \frac{(925 \text{ W}) \cdot 1,35}{0,7} = 1.784 \text{ W}$$

$$N = \sqrt[3]{\frac{P}{K\rho d^5}} = \sqrt[3]{\frac{925 \text{ W}}{1 \cdot \left(997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot (0,4 \text{ m})^5}} = 4,54 \text{ rps} = 272 \text{ rpm}$$

$$N_{RE} = \frac{\rho N d^2}{\mu} = \frac{\left(997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot (4,54 \text{ rps}) \cdot (0,4 \text{ m})^2}{10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 714.923$$

Para las cámaras de floculación, se procedió de la misma manera, con la diferencia que, como éstas se encuentran en el floccodecantador compacto, el ancho y la profundidad de las cámaras corresponden a las del equipo general, es decir 2,4 y 2,75 metros respectivamente.

Para la cámara de sedimentación, el volumen se calcula igualmente a través del tiempo de residencia del equipo y se define el ancho de 2,4 metros y la profundidad de 2,75 metros.

$$V = Q \cdot t = \left(20 \frac{\text{L}}{\text{s}}\right) \cdot \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1.000 \text{ L}}\right) \cdot (17 \text{ min}) \cdot \left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}\right) = 20,88 \text{ m}^3$$

$$Largo = \frac{V}{Ancho \cdot Profundidad} = \frac{20,88 \text{ m}^3}{(2,4 \text{ m}) \cdot (2,75 \text{ m})} = 3,16 \text{ m}$$

Como se modificaron las dimensiones de los perfiles de las lamelas, se debe recalcular la profundidad que tienen, para lo cual se utilizó el valor óptimo de 20 de la longitud relativa del sedimentador L .

$$l = L \cdot e = 20 \cdot (0,05 \text{ m}) \cdot \cos(60^\circ) = 0,5 \text{ m}$$

De ahí, se reemplazan las ecuaciones (11) y (12) en la ecuación (8) para lograr que la única incógnita de la ecuación (7) sea la velocidad promedio del agua en las lamelas.

$$L_c = L - L' = 20 - 0,013N_{RE} = 20 - \frac{0,013v_o e}{v} = 20 - \frac{0,013 \cdot (0,05 \text{ m}) \cdot v_o}{10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}$$

$$v_o = \frac{v_{sc} \cdot (\text{sen}\theta + L_c \cdot \text{cos}\theta)}{S_c}$$

$$v_o = \frac{\left(59 \frac{\text{m}}{\text{d}}\right) \cdot \left(\text{sen}(60^\circ) + \left(20 - \frac{0,013 \cdot (0,05 \text{ m}) \cdot v_o}{10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}\right) \cdot \text{cos}(60^\circ)\right)}{\frac{11}{8}}$$

Despejando se obtiene el siguiente resultado.

$$v_o = 402 \frac{\text{m}}{\text{d}}$$

De ahí, se pueden calcular el resto de los parámetros.

$$N_{RE} = 232$$

$$L' = 3,0$$

$$L_c = 17$$

Aparte, se puede calcular el área superficial del sedimentador cubierta por lamelas a través de la ecuación (13).

$$A = \frac{v_o \cdot \text{sen}(60^\circ)}{Q} = \frac{\left(402 \frac{\text{m}}{\text{d}}\right) \cdot \text{sen}(60^\circ) \cdot \left(\frac{1 \text{ día}}{3600 \text{ s} \cdot 24 \text{ h}}\right)}{\left(20 \frac{\text{L}}{\text{s}}\right) \cdot \left(\frac{1 \text{ L}}{1.000 \text{ m}}\right)} = 4,97 \text{ m}^2$$

Además, utilizando la ecuación (14), se puede obtener el tiempo de retención del flujo en las lamelas.

$$t_p = \frac{l}{v_o} = \frac{0,5 \text{ m}}{\left(402 \frac{\text{m}}{\text{d}}\right) \cdot \left(\frac{1 \text{ d}}{1.440 \text{ min}}\right)} = 3,6 \text{ min}$$

Todos estos resultados se encuentran resumidos en las tablas 20 y 21.

Tabla 20. Resultados de cálculos de los parámetros de diseño preliminares para las cámaras de mezcla rápida y de floculación de los floccodecantadores.

Cámara	Mezcla rápida	Floculación 1	Floculación 2	Floculación 3
Gradiente de velocidad (s^{-1})	834	99,3	54,1	19,1
Diámetro del impulsor del agitador (m)	0,40	0,76	0,76	0,76
Tipo de agitador	Hélice, pitch = 2 y 3 aletas			
Velocidad angular (rpm)	272	40,5	27,0	13,5
Potencia entregada al fluido (W)	925	148	43,8	5,48
Potencia real del motor (W)	1.784	285	84,5	10,6
Tiempo de residencia (s)	66,6	750	750	750
Número de Reynolds	714.923	386.618	257.745	128.873

Tabla 21. Resultados de cálculos de los parámetros de diseño preliminares para la cámara de sedimentación de los floccodecantadores.

Tipo de lamelas	Perfiles cuadrados
Dimensiones de lamelas	5x5 cm
Profundidad de lamelas (m)	0,5
Tiempo de residencia (min)	17
Tiempo de retención en lamelas (min)	3,6
Carga superficial (m/d)	276
Velocidad crítica de asentamiento (m/d)	59
Número de Reynolds	232
Velocidad media en lamelas v_o (m/d)	402
Longitud relativa L	20
Longitud relativa L'	3,0
L_c	17
Área superficial cubierta por lamelas (m^2)	4,97
Velocidad horizontal del flujo (m/d)	262

B.4. Diseño final de los floccodcantadores.

Los cálculos de los parámetros para el diseño final de los equipos compactos se realizaron de la misma manera que para el cálculo de los floccodcantadores existentes, a excepción con los casos cuando se consideró el uso de un agitador de paletas. Para la primera cámara de floculación del equipo que cuenta con 2 de éstas, se definió el gradiente de velocidad como el promedio entre los gradientes de las 2 primeras cámaras de floculación de la planta de Hualqui.

$$G = \frac{(99,3 + 54,1) s^{-1}}{2} = 76,7 s^{-1}$$

De ahí, la potencia entregada al agua se calcula a través de la ecuación (1).

$$P = G^2 \cdot \mu \cdot V = (76,7 s^{-1}) \cdot \left(10^{-3} \frac{kg}{m \cdot s}\right) \cdot (2,4 m) \cdot (3,4 m) \cdot (2,75 m) = 132 W$$

Luego, el área total de las paletas se calcula usando la ecuación (18).

$$A_p = 0,15 \cdot W_f \cdot h_f = 0,15 \cdot (2,4 m) \cdot (2,75 m) = 0,99 m^2$$

Para este caso, se tomó en cuenta un porcentaje de 15% para el área ocupada por las paletas en el flocculador. Además, se definió que el sistema contaría con 2 paletas y un largo de ellas de 2,1 metros, según las recomendaciones de diseño (Baque, 2001). Ahora, utilizando la ecuación (19), se calcula el ancho de las paletas.

$$W_p = \frac{A_p}{N^{\circ} \text{ paletas} \cdot L_p} = \frac{0,99 m^2}{2 \cdot (2,1 m)} = 0,24 m$$

De ahí, se calcula la velocidad de giro utilizando las ecuaciones (20).

$$v_g = \sqrt[3]{\frac{2P}{C_d \cdot A_p \cdot \rho}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot (132 W)}{1,28 \cdot (0,99 m^2) \cdot \left(997 \frac{kg}{m^3}\right)}} = 0,59 \frac{m}{s}$$

El coeficiente de arrastre de las paletas se obtiene de la tabla 22.

Tabla 22. Valores del coeficiente de arrastre de las paletas (Arboleda, 2000).

L/W	N_{RE}	C_d
1	$> 10^3$	1,16
5	$> 10^3$	1,20
20	$> 10^3$	1,50
40	$> 10^3$	1,80
∞	$> 10^3$	1,95

Ahora, a través de las ecuaciones (21) y (22), se pueden calcular la velocidad de las paletas y la velocidad angular. Se definió un radio de giro de 0,47 metros.

$$v_p = \frac{v_g}{0,75} = \frac{0,59 \frac{m}{s}}{0,75} = 0,79 \frac{m}{s}$$

$$N = \frac{v_p}{2\pi \cdot R} = \frac{0,79 \frac{m}{s}}{2\pi \cdot (0,5 m)} = 0,27 \text{ rps} = 16 \text{ rpm}$$

Finalmente, la potencia entregada al eje se calcula multiplicando la potencia entregada al flujo por un factor de 3,5, lo cual entrega un resultado de 462 W.

Para el resto de las cámaras de floculación, se sigue el mismo procedimiento; la única diferencia es el valor del gradiente de velocidad y los valores elegidos para el radio de giro, el porcentaje del área ocupada por las paletas y el largo de las paletas. Para la segunda cámara del equipo que posee 2 de ellas, el gradiente de velocidad se calcula a través del promedio de los gradientes de la segunda y la tercera cámara de floculación de la planta de Hualqui. Todos los resultados de estos cálculos se presentan en las tablas 23 a 25.

Tabla 23. Resultados de los cálculos de parámetros para las cámaras de floculación del diseño final de los floccodcantadores compactos con agitador de turbina.

Equipo	2 cámaras de floculación		3 cámaras de floculación		
	1	2	1	2	3
Cámara de floculación					
Gradiente de velocidad (s^{-1})	76,7	36,6	99,3	54,1	20
Diámetro del impulsor del agitador (m)	1,0	1,0	0,80	0,80	0,80
Velocidad angular (rpm)	17,5	10,7	25,3	16,9	8,43
Potencia entregada al fluido (W)	132	30,1	150	44,3	6,07
Potencia real del motor (W)	255	58	289	85,5	11,7

Tabla 24. Resultados de los cálculos de parámetros para las cámaras de floculación del diseño final de los floccodcantadores compactos con agitador de paletas.

Equipo	2 cámaras de floculación		3 cámaras de floculación		
	1	2	1	2	3
Cámara de floculación					
Gradiente de velocidad (s^{-1})	76,7	36,6	99,3	54,1	20
Área total de paletas (m^2)	0,99	0,99	0,99	0,99	0,66
Número de paletas	2	2	2	2	2
Largo de paletas (m)	2,1	2,1	1,0	1,0	1,0
Ancho paletas (m)	0,24	0,24	0,50	0,50	0,33
Radio de giro (m)	0,47	0,47	1,0	1,0	0,66
Velocidad de giro (m/s)	0,59	0,36	0,62	0,41	0,24
Velocidad de paletas (m/s)	0,79	0,48	0,83	0,55	0,32
Velocidad angular (rpm)	16	9,8	7,9	5,3	4,7
Potencia entregada al fluido (W)	132	30,1	150	44,3	6,1
Potencia en el eje (W)	462	105	524	155	21,3

Tabla 25. Resultados de los cálculos de parámetros para la cámara de sedimentación del diseño final de los floccodecantadores compactos.

Tipo de lamelas	Perfiles cuadrados
Dimensiones de lamelas	5x5 cm
Profundidad de lamelas (m)	0,6
Tiempo de residencia (min)	22
Carga superficial (m/d)	180
Velocidad crítica de asentamiento (m/d)	32,1
Número de Reynolds	160
Velocidad media en lamelas v_o (m/d)	277
Longitud relativa L	24,0
Longitud relativa L'	2,0
L_c	21,9
Área superficial cubierta por lamelas (m ²)	7,22
Velocidad horizontal del flujo (m/d)	262

Anexo C – Análisis de Sensibilidad

C.1. Diseño de lamelas

Para poder determinar el diseño óptimo de las lamelas del sedimentador, se llevaron a cabo análisis de sensibilidad en dónde se varió la separación de los perfiles, así como también la profundidad de éstos, para observar el efecto en la velocidad crítica de asentamiento, la longitud relativa y el número de Reynolds.

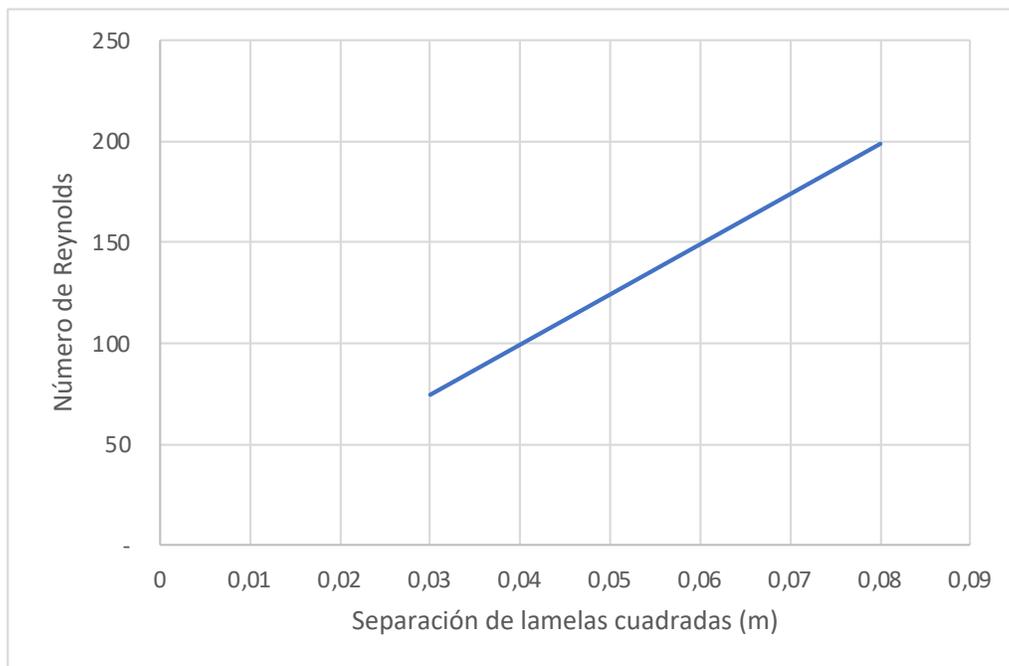


Figura 36. Gráfico del número de Reynolds en función de la separación de las lamelas.

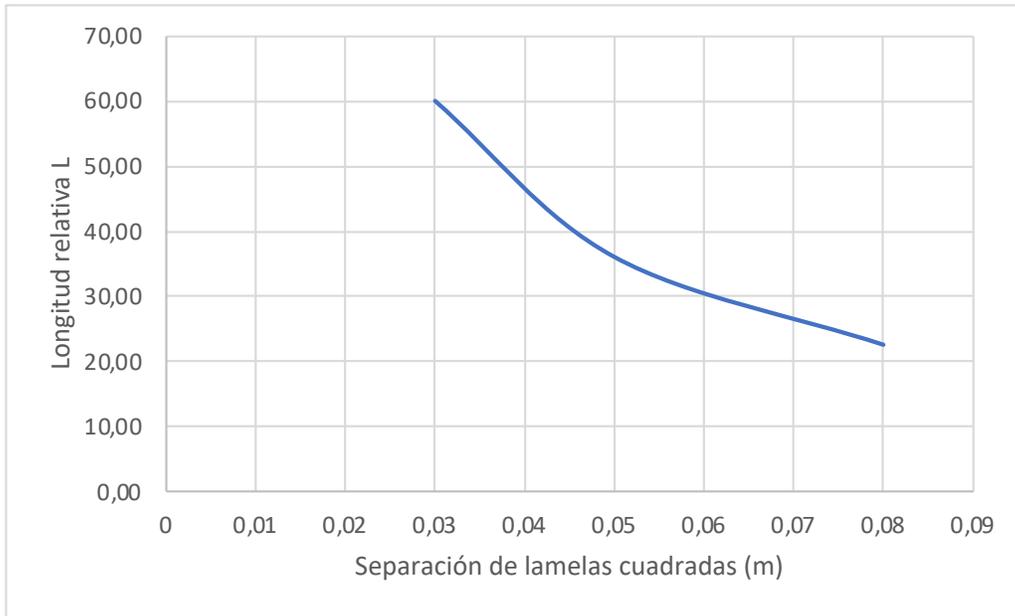


Figura 37. Gráfico de la longitud relativa del sedimentador en función de la separación de las lamelas.

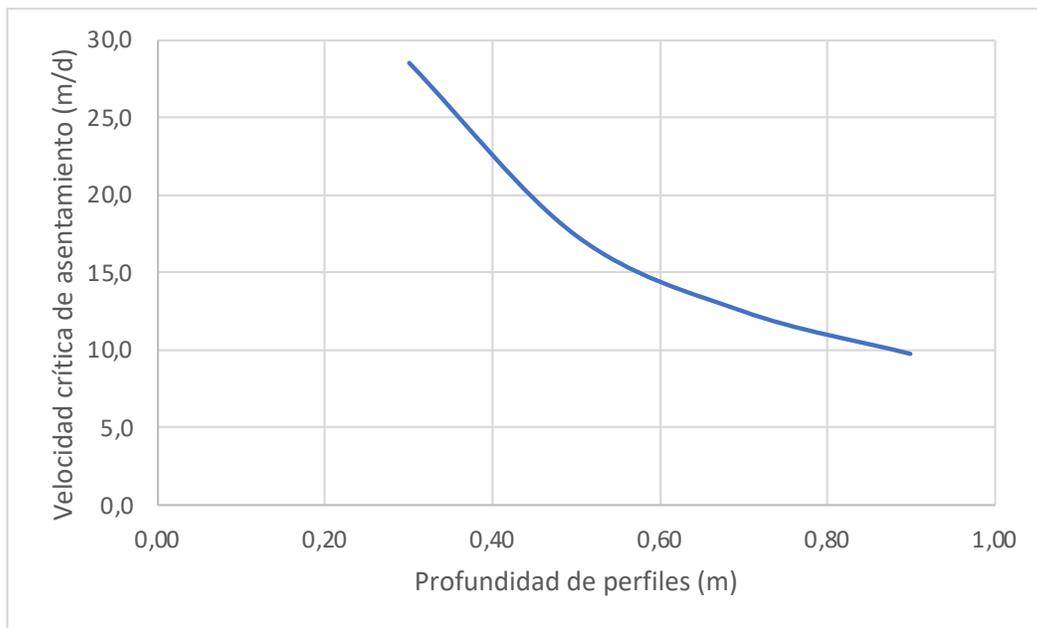


Figura 38. Gráfico de la velocidad crítica de asentamiento en función de la profundidad de los perfiles.

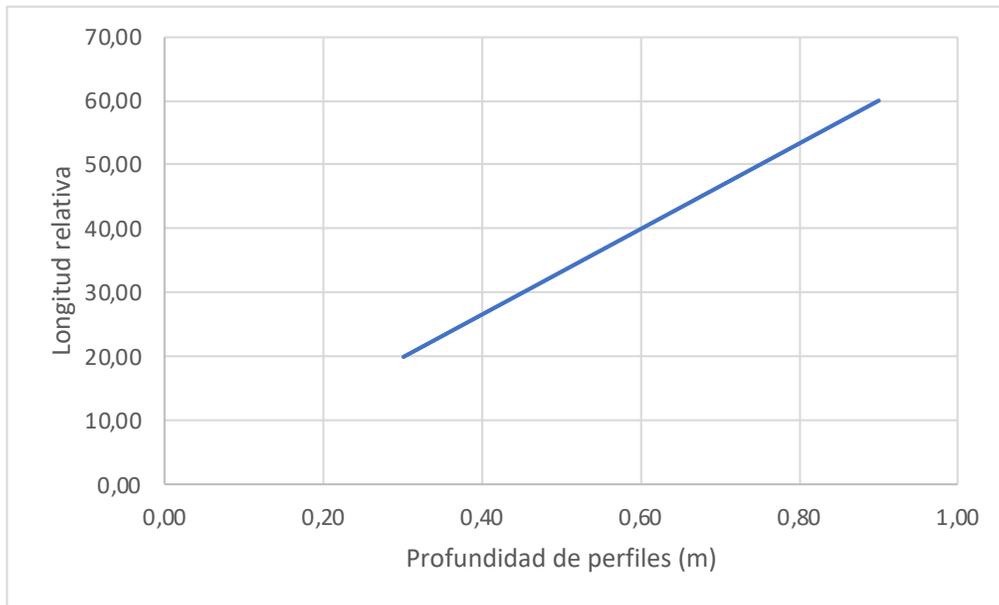


Figura 39. Gráfico de la longitud relativa del sedimentador en función de la profundidad de los perfiles.

Además, se varió el área superficial cubierta por los perfiles para observar su efecto sobre la velocidad crítica de asentamiento y el número de Reynolds, lo cual se encuentra graficado en las figuras 19 y 40.

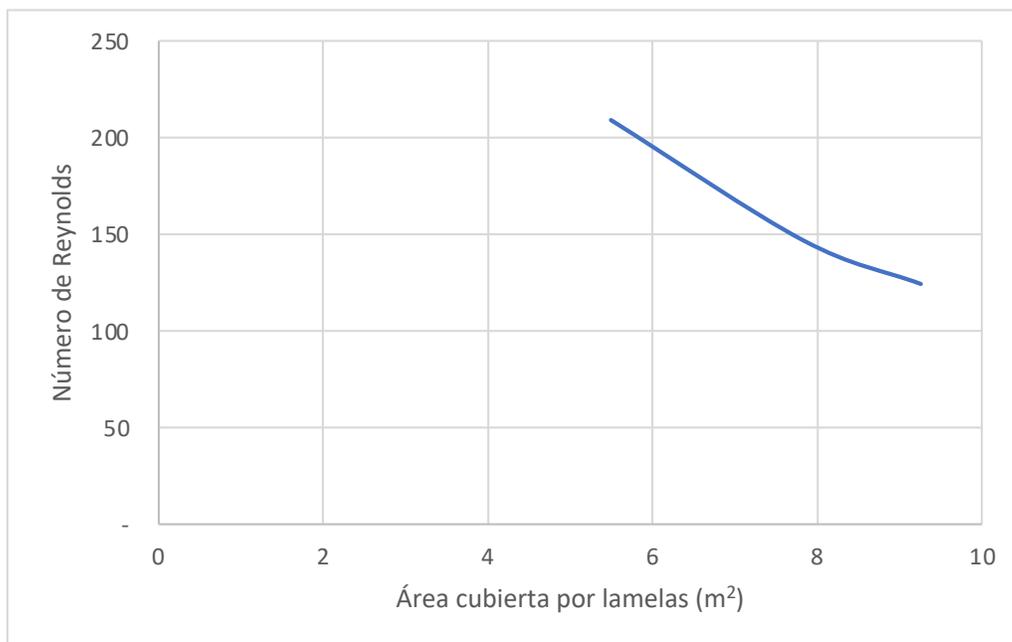


Figura 40. Gráfico del número de Reynolds en función del área superficial cubierta por las lamelas.

C.2. Dimensiones de las cámaras de procesos.

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para determinar la distribución óptima del espacio para las cámaras de floculación y sedimentación. Para esto, se varió el largo de cada cámara y se analizaron los diferentes parámetros de estos procesos.

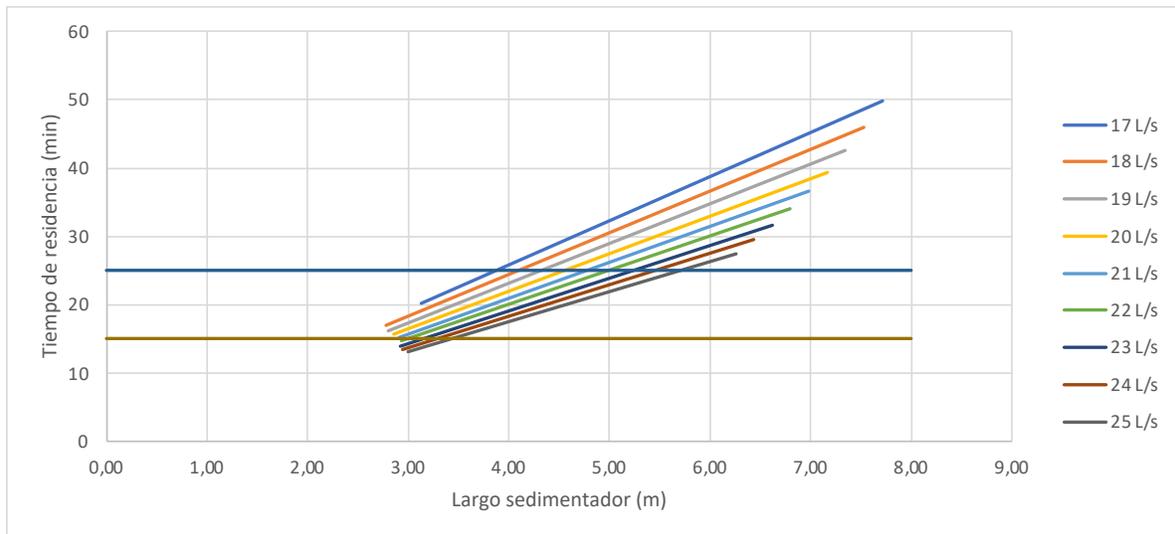


Figura 41. Gráfico del tiempo de residencia de la cámara de sedimentación en función de su largo.

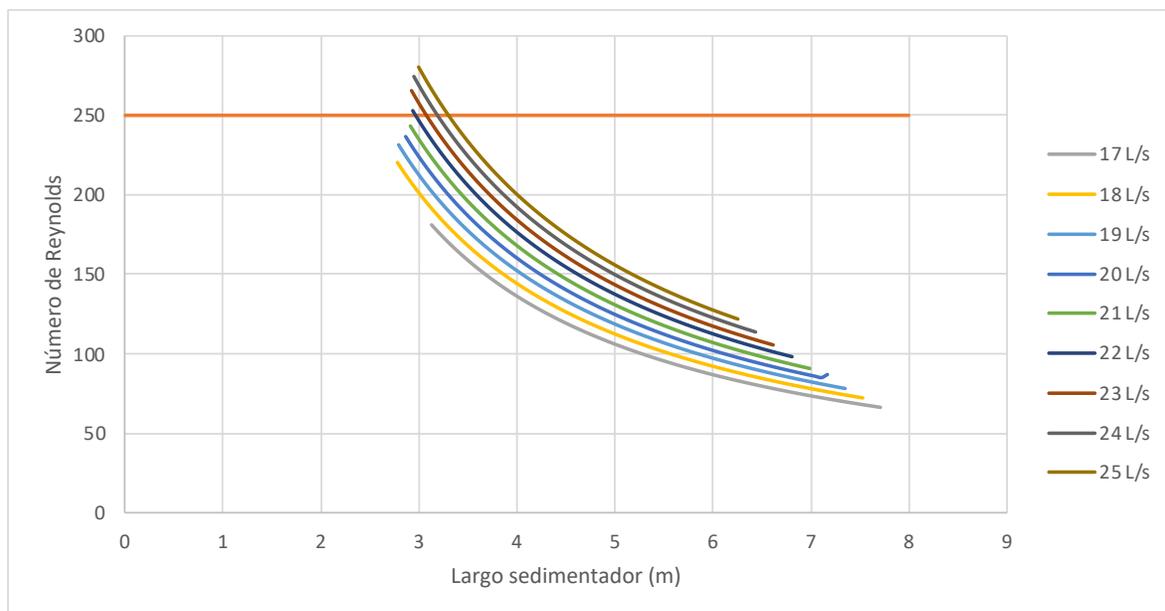


Figura 42. Gráfico del número de Reynolds de la cámara de sedimentación en función de su largo.

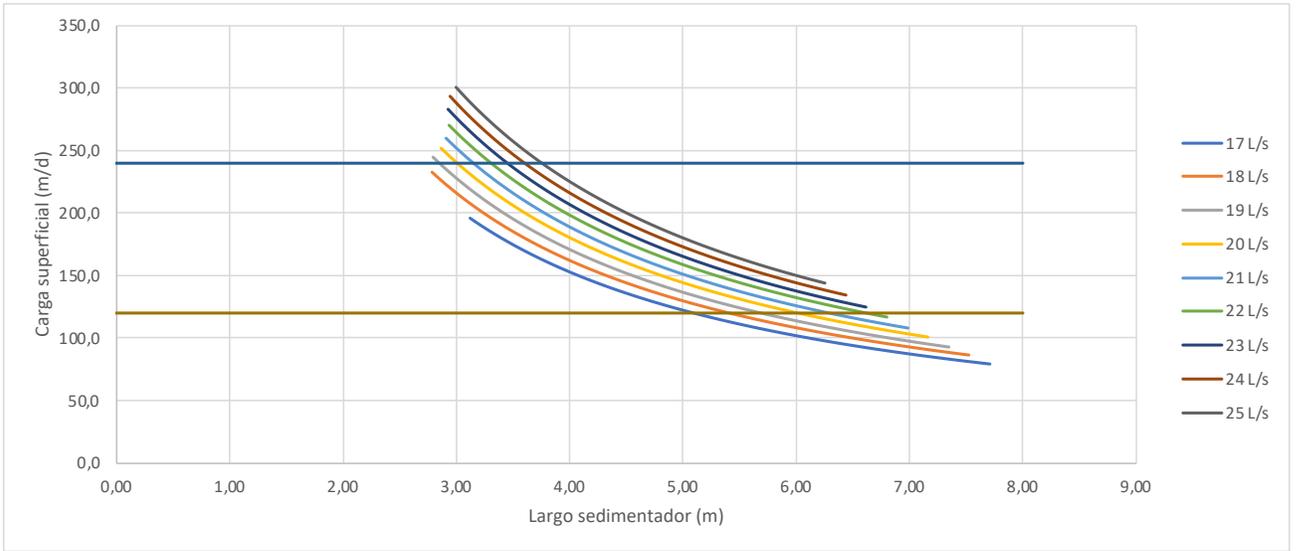


Figura 43. Gráfico de la carga superficial de la cámara de sedimentación en función de su largo.

Finalmente, se realizaron análisis de sensibilidad para observar el efecto de la variación del caudal en los parámetros de las cámaras de floculación y de sedimentación de estos equipos. Los gráficos de las figuras 44 a 46 corresponden a los análisis para las cámaras de sedimentación.

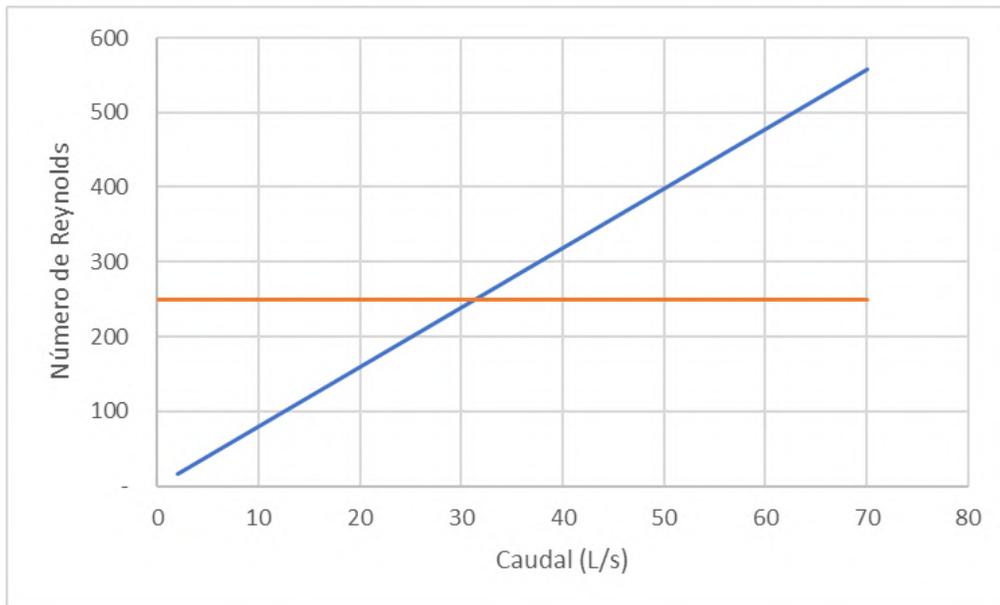


Figura 44. Gráfico del número de Reynolds en función del caudal para la cámara de sedimentación del diseño final de los flocodecantadores.

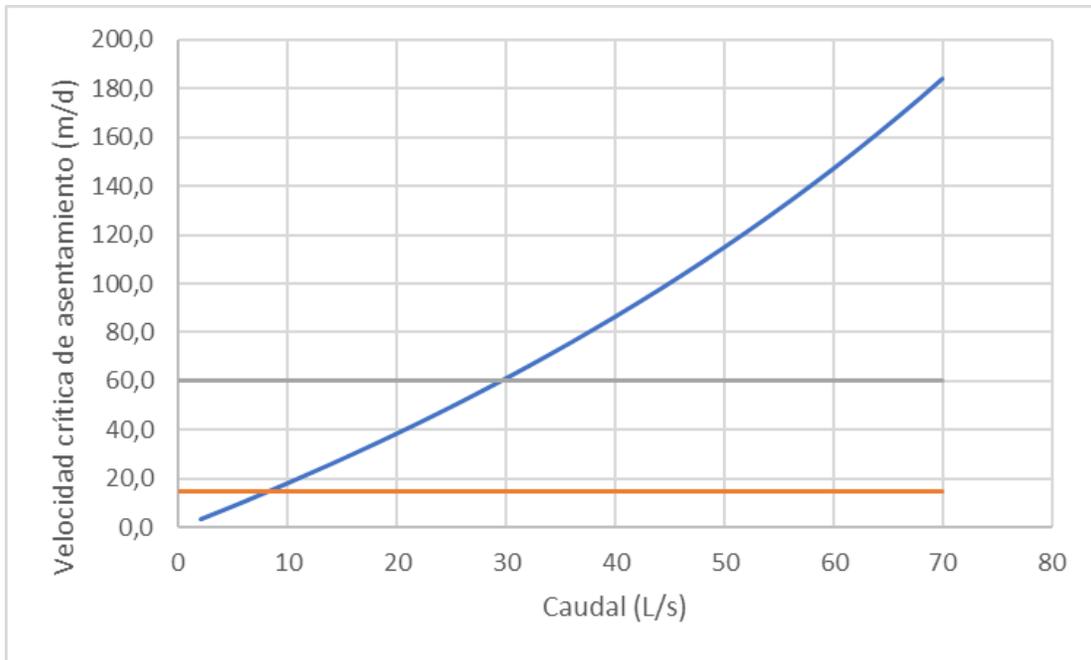


Figura 45. Gráfico de la velocidad de asentamiento en función del caudal para la cámara de sedimentación del diseño final de los floccodecantadores.

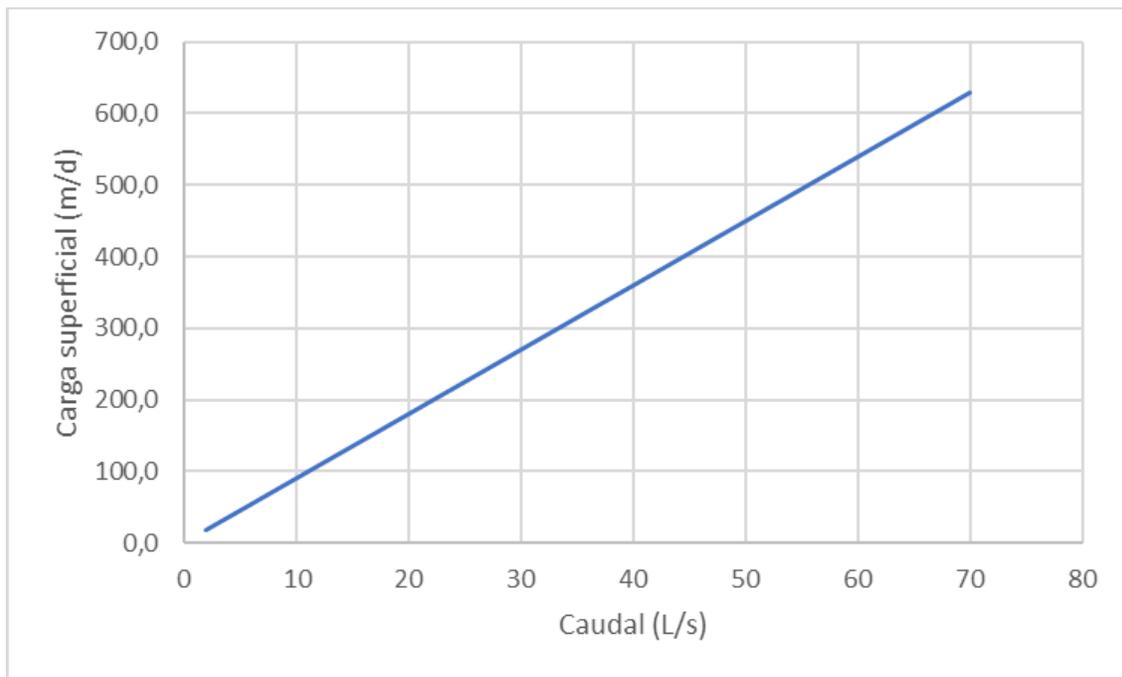


Figura 46. Gráfico de la carga superficial en función del caudal para la cámara de sedimentación del diseño final de los floccodecantadores.

Anexo D – Diseño final de los flocodecantadores compactos

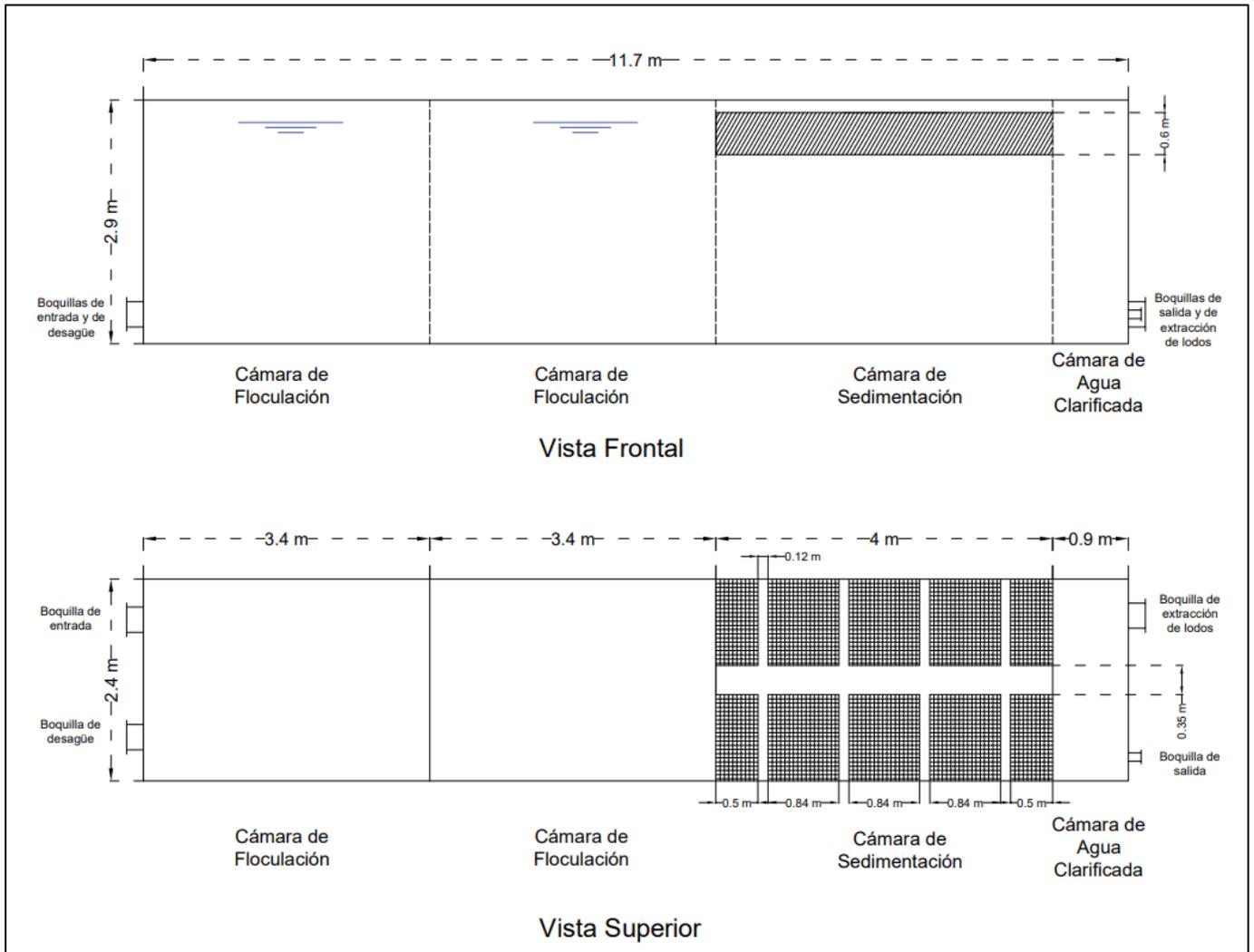


Figura 47. Croquis del diseño final para el flocodecantador de 2 cámaras de flocculación

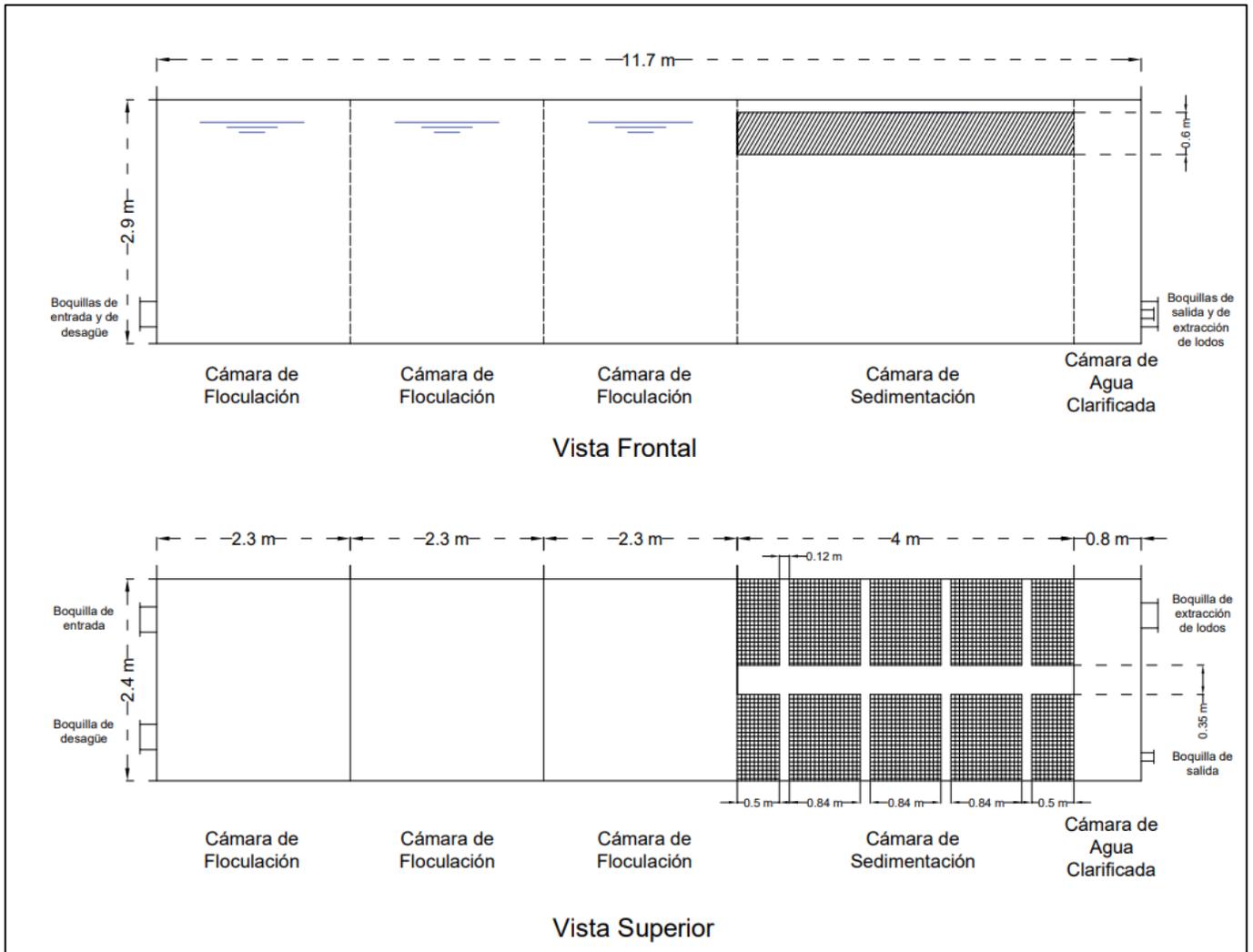


Figura 48. Croquis del diseño final para el flocodecantador de 3 cámaras de floculación

Anexo E – Mejoras adicionales

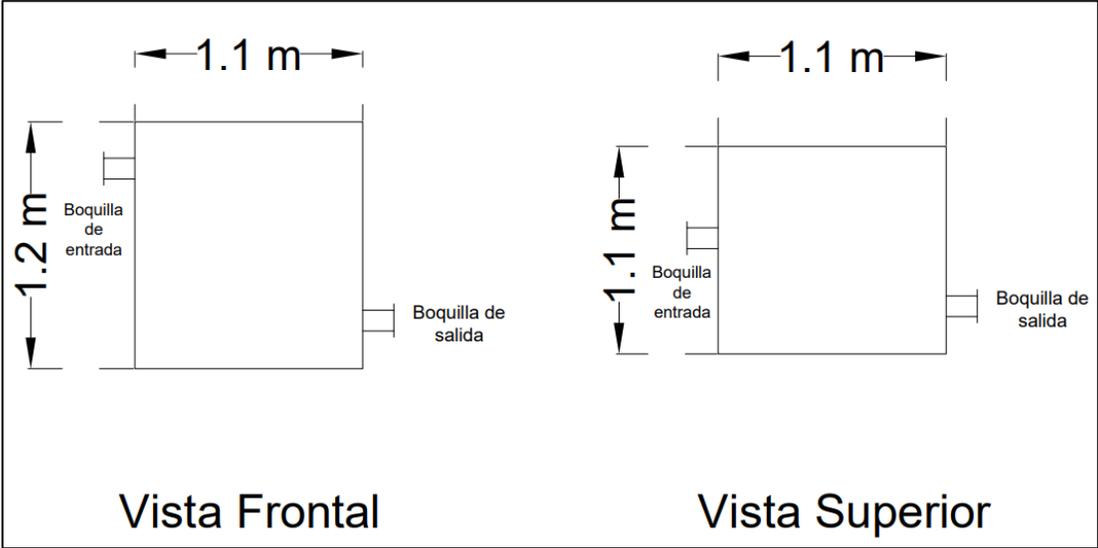


Figura 49. Croquis del estanque de mezcla rápida.

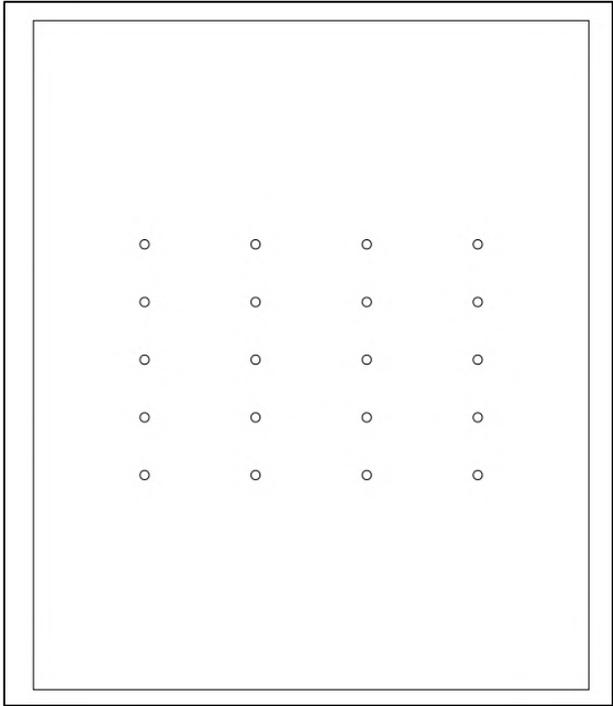


Figura 50. Croquis de la pared entre cámaras de floculación de los flocodecantadores.

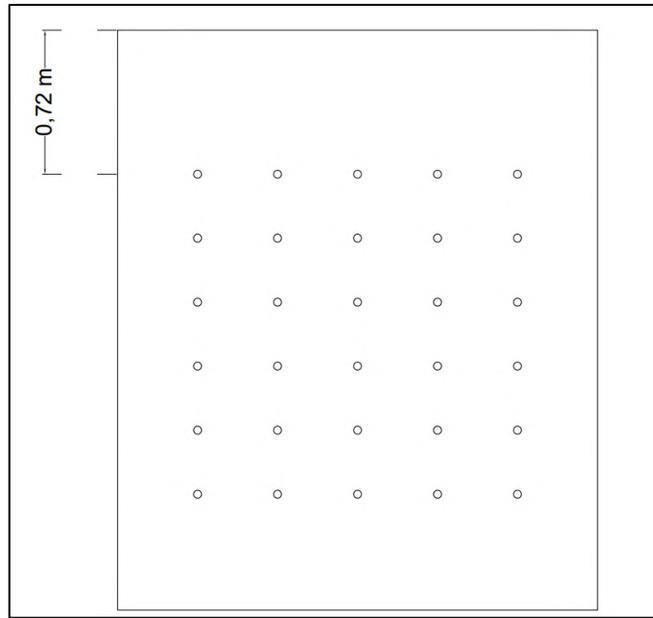


Figura 51. Croquis de la pared entre la última cámara de floculación y la cámara de sedimentación de los floccodecantores.



Figura 52. Agitador hiperbólico (Lanshen Group, 2019).