



Universidad del Azuay

Facultad de Ciencia y Tecnología

Escuela de Ingeniería Civil

**Diseño de una planta compacta para el tratamiento de agua potable
optimizando el uso del área de emplazamiento**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO CIVIL

Autores:

MARIA VALENTINA GUILLEN ARTEAGA

JEIMY CAROLINA MOGROVEJO TAPIA

Director:

ING. JOSUÉ LARRIVA

CUENCA ECUADOR

2025

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía, mi refugio en los momentos difíciles y la fuerza que me sostuvo en cada paso de este camino.

A mi madre Tatiana Arteaga,
por ser ejemplo de fortaleza, disciplina y determinación inquebrantable.
Por enseñarme, a ser constante y mantenerme firme en medio de las adversidades.
Gracias por nunca dejarte caer frente a nosotros y regalarnos seguridad, por levantarme cada vez que la vida quiso detenerme.

Y, sobre todo, gracias por tu fe inquebrantable, que ha sido guía, refugio y esperanza en los momentos más difíciles. Tú confianza en Dios y en los caminos invisibles me enseñó a no temer, a seguir, a confiar.

Este logro no habría sido posible sin tu amor firme y esa fe profunda que ha sostenido a toda nuestra familia.

A mi papá Jorge Guillen,
por ser siempre amor en su forma más pura: generoso, cariñoso, alegre y de corazón inmenso.
Gracias por acompañarme con tu ternura, por enseñarme con tu ejemplo a vivir sin rencores y con una sonrisa siempre lista.
Por enseñarme que la familia es un refugio sagrado, lo más valioso que tenemos, y que cuidarla y valorarla es la verdadera riqueza de la vida.
Por enseñarme que la fortaleza también se muestra con ternura, con empatía y con una sonrisa sincera, te dedico con profundo amor este logro.

A mis hermanos Jorge y Daniel,
aunque nunca fuimos muy expresivos en cariño, siempre estuvieron presentes cuando más los necesitaba.
En los momentos difíciles, su apoyo fue firme y silencioso, y en los logros, su alegría fue sincera y compartida.

Gracias por ser ese respaldo constante, aunque sin muchas palabras, pero con acciones que hablan más fuerte que cualquier gesto.
Este triunfo también es suyo

Y a mi compañera de tesis Caro Mogrovejo, por ser más que una colega: una amiga, una aliada incansable y una parte esencial de este logro. Gracias por compartir este proceso con compromiso, paciencia y trabajo en equipo.

DEDICATORIA

A Dios por ser mi fuerza en cada paso que di, y mi refugio cuando más lo necesitaba.

A mi papá Favian Mogrovejo, mi primer amor, el hombre que con su ejemplo, esfuerzo y ternura ha marcado mi vida de forma profunda. Gracias por estar siempre dispuesto a ayudarme, por entregarte por completo para que a mí no me falte nada, y por cuidar de mí con tanto amor en cada paso que doy. Tu presencia constante ha sido mi refugio y mi fuerza. Tu alegría, tu forma de ver la vida y esa calidez que transmites a todos los que te rodean, me han enseñado a vivir con gratitud y optimismo. Esta tesis es también tuya, porque todo lo que soy y he logrado, tiene mucho de ti.

A mi mamá Gilda Tapia, por ser un ejemplo constante de humildad y sabiduría, por ser capaz de reconocer sus errores y aprender de ellos. Gracias por tu apoyo incondicional y por estar dispuesta a ayudarme en cada paso de este camino. Tu fe y apego a Dios han sido una inspiración que me ha fortalecido en los momentos difíciles. Agradezco tu sociabilidad y calidez, que han hecho que nunca me sienta sola, y tus consejos, siempre llenos de conocimientos, que han guiado mi camino con amor. Esta tesis es también para ti, porque sin ti nada de esto hubiera sido posible.

A mi querida familia de 10, gracias por ser una parte tan especial de mi vida. Cada uno, con su cariño, palabras de aliento y gestos de apoyo, ha dejado una huella en este camino que hoy culmina. A mis abuelitos Segundo y Rosa, por su amor incondicional y por enseñarme el valor de la sabiduría y la sencillez. A mis tíos Diego y Cecy y a mi madrina Mary, por estar presentes con consejos, compañía y afecto en los momentos que más los necesité. A mis primos Josu y Vale, por compartir conmigo risas, juegos y recuerdos que siempre llevaré en el corazón. Esta tesis también la dedico a ustedes, porque el amor de una familia es una de las fuerzas más poderosas para alcanzar los sueños.

A mi compañera de tesis Vale Guillen, por ser más que una compañera, mi amiga con la que compartí, risas, estrés y logros. Gracias por caminar a mi lado en este reto y nunca rendirte.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos, en primer lugar, a Dios, por habernos dado la fuerza, la salud y la sabiduría necesarias para culminar este proceso.

A nuestro director de tesis Ing. Josue Larriva, gracias por su orientación, su tiempo y sus valiosos aportes a este trabajo. Su compromiso y paciencia fueron fundamentales en el desarrollo de esta investigación.

A nuestros amigos Mateo M, Carlos, Mateo T, Ricardo, Fernando, Evelyn, Juan Francisco, Víctor, Christian, Paula, y Jeisson por estar presentes en cada etapa de este proceso, por su apoyo, por las risas compartidas y por ser parte de esta historia.

INDICE DE CONTENIDOS

Resumen	11
Abstract.....	12
DISEÑO DE UNA PLANTA COMPACTA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE OPTIMIZANDO EL USO DEL ÁREA DE EMPLAZAMIENTO	13
INTRODUCCIÓN.....	13
OBJETIVOS	14
Objetivo general.....	14
Objetivos específicos	14
1. CAPITULO 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	15
1.1 PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA.....	15
1.2 FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA COMPACTA	16
1.2.1. FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE SAN PEDRO.....	20
2. CAPITULO 2 DISEÑO DE LA PLANTA COMPACTA.....	26
2.1 DISEÑO CON MEDIDAS OPTIMIZADAS PARA CAUDALES PEQUEÑOS	26
2.1.1 DISEÑO DE LA MEZCLA RÁPIDA CON RESALTO HIDRÁULICO.....	26
2.1.2 DISEÑO DE FLOCULADORES MECÁNICOS.....	32
2.1.3. DISEÑO DE SEDIMENTADORES.....	34
2.1.4 DISEÑO DE FILTRACIÓN	38
2.2. PROPUESTA DE MATERIALES Y CONFIGURACIÓN	45
3. CAPITULO 3: ANÁLISIS DE COSTOS DE CONSTRUCCION.....	47
3.1 Analizar los costos de construcción con recursos nacionales	48
3.2 Resultados	49
3.2.1 Discusiones	51
ANEXOS	53

Bibliografía.....	61
-------------------	----

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Flujo uniforme iteración 1	27
Tabla 2.2 Flujo Uniforme Iteración 2	27
Tabla 2.3 Flujo Uniforme Iteración 3	28
Tabla 2.4. Resultados resalto hidráulico y alturas conjugadas	30
Tabla 2.5. Resultados velocidad media, perdida del resalto y gradiente de velocidad	31
Tabla 2.6. Resultados floculadores	33
Tabla 2.7. Resultados abertura en pantalla	34
Tabla 2.8. Velocidad de sedimentación y velocidad de ascenso	36
Tabla 2.9. Área y tiempos de sedimentación	38
Tabla 2.10. Datos planta de diseño	39
Tabla 2.11. Resultados del filtro planta diseño	44
Tabla 2.12 Presupuesto referencial planta compacta	46

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1. Manning	
Ecuación 2.2 Pérdida de la energía.....	28
Ecuación 2.3 Relación de alturas en el resalto hidráulico	29
Ecuación 2.4 Longitud de resalto hidrulico.....	29
Ecuación 2.5 Velocidad media en el resalto	30
Ecuación 2.6 Pérdida del resalto	30
Ecuación 2.7 Gradiente de velocidad	31
Ecuación 2.8 Potencia disipada	32
Ecuación 2.9 Velocidad de sedimentación	35
Ecuación 2.10 Área de filtración	40
Ecuación 2.11 Velocidad de arrastre para la arena.....	40
Ecuación 2.12 Velocidad de fluidización	41
Ecuación 2.13 Velocidad de lavado a 20°C.....	41
Ecuación 2.14 Velocidad de lavado a 11°C.....	41
Ecuación 2.15 Caudal de lavado	42
Ecuación 2.16 Lámina de agua de la canaleta	42
Ecuación 2.17 Altura total de la canaleta	42
Ecuación 2.18 Volumen de lavado	43
Ecuación 2.19 Volumen filtrado en un día	43
Ecuación 2.20 Porcentaje de lavado	43

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1 Dosificación del sulfato de aluminio.....	21
Ilustración 1.2. Agitadores mecánicos	22
Ilustración 1.3. Sedimentadores.....	23
Ilustración 1.4. Filtros.....	24
Ilustración 1.5. Sulfato de Aluminio	25

Resumen

El presente trabajo de titulación desarrolla el diseño técnico de una planta compacta para el tratamiento de agua potable, orientado a optimizar el uso del área de emplazamiento y atender las necesidades de comunidades con limitaciones espaciales y caudales reducidos. El diseño abarca todas las unidades funcionales del tratamiento convencional: mezcla rápida, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Se utilizaron criterios hidráulicos y estructurales basados en normativa nacional, aplicando principios como la Ley de Stokes, gradientes de mezcla, tiempos de residencia y velocidad de ascenso, para garantizar la eficiencia del proceso.

El diseño integra materiales disponibles en el mercado ecuatoriano, componentes modulares y dimensiones compatibles con una construcción sencilla y mantenible. Se realizó además un análisis referencial de costos de construcción, considerando precios unitarios actualizados y partidas específicas para cada componente de la planta. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad técnica y económica de implementar este tipo de sistemas en zonas rurales o periurbanas, promoviendo soluciones eficientes, accesibles y sostenibles para el abastecimiento de agua potable.

Palabras clave: planta compacta, tratamiento de agua potable, diseño hidráulico, sedimentación, filtración, optimización de área.

Abstract

This thesis presents the technical design of a compact water treatment plant, aimed at optimizing land use and addressing the needs of communities with limited space and low flow rates. The proposed system includes all conventional treatment stages: rapid mixing, flocculation, sedimentation, filtration, and disinfection. The design is based on hydraulic and structural criteria drawn from national and international standards, applying key principles such as Stokes' Law, mixing gradients, detention times, and upward velocity to ensure process efficiency.

The plant layout incorporates locally available materials, modular components, and construction-friendly dimensions. A referential construction cost analysis was also conducted, using updated unit prices and itemized estimates for each plant component. The results confirm the technical and economic feasibility of implementing this type of system in rural or peri-urban areas, promoting efficient, accessible, and sustainable drinking water solutions.

Keywords: compact plant, drinking water treatment, hydraulic design, sedimentation, filtration, land optimization.

DISEÑO DE UNA PLANTA COMPACTA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE OPTIMIZANDO EL USO DEL ÁREA DE EMPLAZAMIENTO

INTRODUCCIÓN

En el contexto actual, donde los recursos hídricos son cada vez más escasos, es fundamental optimizar el uso del espacio y garantizar un tratamiento efectivo del agua. La implementación de soluciones sostenibles se presenta como una alternativa viable, ya que permite adaptar la infraestructura a las necesidades específicas de cada comunidad, utilizando materiales locales que no solo reducen costos, sino que también fomentan la economía regional.

Los sistemas de tratamiento paquete que se ofrecen en el mercado suelen tener precios muy altos, lo que tiene un limitante en muchos lugares. Nuestro enfoque se centra en desarrollar un diseño que aproveche productos y recursos disponibles en el entorno local, lo que no solo disminuiría significativamente los costos de implementación, sino que también facilitaría el mantenimiento y la operación del sistema. Al integrar materiales locales, se potencia la capacidad de las comunidades para gestionar sus propios recursos hídricos de manera más eficiente.

Al construir plantas paquetes con insumos locales, se crea una oportunidad para la capacitación de mano de obra y el fortalecimiento de la infraestructura existente. De este modo, no solo se mejora el tratamiento del agua, sino que también se empodera a las comunidades, fomentando un sentido de responsabilidad y cuidado por los recursos que les rodean.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Desarrollar un diseño de una planta compacta de tratamiento de agua potable, adaptada a las necesidades específicas de comunidades pequeñas, que garantice el acceso a agua potable de calidad, cumpliendo con las normativas sanitarias y ambientales

Objetivos específicos

- Realizar un estudio bibliográfico sobre la aplicación de una planta compacta, sus características, beneficios y uso en tratamiento de agua
- Elaborar un diseño de un modelo aplicable a comunidades pequeñas para caudales entre 1 y 5 litros por segundo
- Analizar el costo de la implementación de una planta compacta en comunidades pequeñas

1. CAPITULO 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA

El agua es un recurso esencial para la vida y su disponibilidad en condiciones seguras y adecuadas para el consumo humano es una prioridad global. En este contexto, el tratamiento de agua potable emerge como un proceso fundamental para garantizar la salud pública, el desarrollo económico y el bienestar social (RAD, 2017). Este proceso abarca una serie de etapas que, trabajando de manera complementaria, eliminan impurezas físicas, químicas y biológicas presentes en el agua cruda, logrando que cumpla con los estándares de calidad establecidos por las normativas internacionales y locales (INEN, 2014).

El tratamiento de agua puede adaptarse a diferentes fuentes, ya sean superficiales (como ríos, lagos y embalses) o subterráneas (acuíferos), cada una de las cuales presenta características particulares en cuanto a composición y calidad. Las aguas superficiales suelen estar más expuestas a contaminantes, como sólidos suspendidos, microorganismos patógenos, materia orgánica y compuestos químicos provenientes de la actividad humana (FAO, 2006). Por otro lado, las aguas subterráneas tienden a tener una composición más estable, pero pueden contener minerales disueltos, como hierro y manganeso, que requieren un enfoque específico para su remoción.

En términos generales, los procesos de tratamiento se estructuran en una secuencia lógica de operaciones unitarias que interactúan entre sí. Aunque cada planta puede diseñarse de manera única según las necesidades específicas de la comunidad o industria a la que sirve, ciertas etapas son comunes y forman la base del tratamiento de agua: la mezcla, la floculación, la sedimentación, la filtración y la desinfección (AWWA, 2011).

Además, la optimización de las plantas de tratamiento, como la incorporación de tecnologías compactas o de bajo consumo energético, permite abordar retos como la limitación de espacio y recursos económicos. Este enfoque es particularmente relevante en áreas urbanas densamente pobladas o en comunidades rurales donde las soluciones tradicionales son inviables (FAO, 2006).

En conclusión, el proceso de tratamiento de agua potable es un sistema interconectado de etapas diseñado para garantizar que el agua cruda se transforme en un recurso seguro y accesible para el consumo humano. Cada etapa, desde la mezcla hasta la desinfección, desempeña un papel fundamental en la eliminación de contaminantes y en la protección de la salud pública. A medida que las demandas de agua potable continúan creciendo en el mundo, la innovación y la sostenibilidad en el diseño y operación de las plantas de tratamiento serán claves para satisfacer estas necesidades de manera eficiente y responsable (AWWA, 2011).

1.2 FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA COMPACTA

Las plantas compactas de tratamiento de agua potable son sistemas modulares que integran, en una sola unidad, todas las etapas necesarias para convertir el agua cruda en agua segura para el consumo humano. Estos sistemas incluyen procesos como mezcla, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección, y están diseñados para facilitar una instalación rápida y una operación sencilla. Gracias a su estructura preensamblada y de tamaño reducido, resultan especialmente útiles en zonas rurales, emergencias o localidades con limitaciones de espacio y recursos técnicos, asegurando el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos. (Hidritec, 2011).

Mezcla: La mezcla en el tratamiento de agua es la etapa inicial en la que se introducen productos químicos, como coagulantes (por ejemplo, sulfato de aluminio o cloruro férrico), al agua cruda para preparar el proceso de coagulación. El objetivo principal de esta fase es distribuir estos químicos de manera uniforme a través del agua, utilizando una agitación rápida y controlada, conocida como mezcla rápida. Durante esta etapa, los coagulantes neutralizan las cargas eléctricas de las partículas suspendidas, como arcillas, materia orgánica y microorganismos, que normalmente se repelen entre sí debido a sus cargas negativas. Al neutralizar estas cargas, las partículas se agrupan, lo que facilita su posterior aglomeración en la etapa de floculación. Según Bastidas (2010) este proceso es crucial porque "la eficiencia de la coagulación depende de factores como el tipo de coagulante utilizado, la dosis aplicada y el tiempo de retención en los mezcladores".

La mezcla es, por tanto, un paso fundamental dentro del proceso de tratamiento de agua, ya que su correcta ejecución impacta directamente en la eficiencia de las etapas siguientes, como la formación de flóculos y su sedimentación. Si el diseño de esta etapa es inadecuado, puede provocar una distribución desigual de los productos químicos, lo que afectaría negativamente la calidad del agua tratada. Una mezcla uniforme y bien controlada asegura que los coagulantes trabajen eficientemente, lo que a su vez optimiza los procesos posteriores de coagulación, floculación y sedimentación, garantizando un tratamiento adecuado del agua.

Coagulación-Floculación: La coagulación es una de las etapas más cruciales en el tratamiento de agua, ya que permite eliminar las partículas suspendidas y los coloides que provocan turbidez, contribuyendo a mejorar la calidad del agua. Este proceso se logra mediante la adición de coagulantes químicos, como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico, los cuales neutralizan las cargas de las partículas, facilitando su unión en flóculos más grandes. La coagulación implica la desestabilización de partículas coloidales al añadir un coagulante con cargas opuestas a las de los sólidos suspendidos, lo que permite que estas pequeñas partículas se adhieran entre sí y formen micro flóculos.

La floculación, que sigue inmediatamente a la coagulación, está estrechamente relacionada con esta etapa en el tratamiento de agua potable. Una vez que las partículas se han agrupado mediante la coagulación, se utilizan agentes floculantes para continuar el proceso de eliminación de impurezas. Los floculantes, que son polímeros de diferentes tamaños, ayudan a que los flóculos formados en la coagulación se desestabilicen y se agranden aún más, lo que permite que caigan fuera de la solución y sean eliminados por completo del agua filtrada. Este proceso no solo elimina la turbidez y el color del agua, sino que también ayuda a remover bacterias, virus, organismos patógenos, algas y sustancias que producen sabor y olor en algunos casos. De acuerdo con Chulluncuy Camacho (2011) la coagulación y floculación deben ser cuidadosamente controladas, ya que su efectividad es crucial para el buen funcionamiento de los sedimentadores y filtros, las siguientes etapas del tratamiento. En las plantas de tratamiento, la coagulación se lleva a cabo en la unidad de mezcla rápida, mientras que la floculación se realiza en los floculadores.

En términos generales, el tratamiento de coagulación-floculación es una de las primeras y más esenciales fases dentro del tratamiento químico de aguas residuales. En lugar de permitir que las partículas se deslicen a través del filtro y caigan lentamente como sedimento, estos procesos las agrupan y mantienen unidas para facilitar su eliminación eficiente, tal como lo explica el Grupo Acura (1988). De esta manera, la coagulación y floculación no solo optimizan el proceso de filtración, sino que son fundamentales para garantizar que el agua tratada cumpla con los estándares de calidad y seguridad para el consumo humano.

Sedimentación: La sedimentación es un proceso físico en el cual las partículas suspendidas en el agua son separadas del líquido debido al efecto de la gravedad. Estas partículas deben ser más densas que el agua, y el resultado es un líquido clarificado junto con una suspensión concentrada (Chulluncuy Camacho, 2011).

La eliminación de partículas puede lograrse dejando que el agua repose para que se sedimenten, filtrándola o aplicando ambos procesos de manera sucesiva, ya que son complementarios. Entre los factores que influyen en la sedimentación se incluyen:

- La calidad del agua, que puede variar según la concentración de partículas suspendidas y la temperatura.
- Las condiciones hidráulicas.
- Los procesos previos realizados antes de la sedimentación.

Filtración: La filtración es un proceso que consiste en separar partículas y pequeñas cantidades de microorganismos, como bacterias y virus, mediante un medio poroso. Es una etapa clave para garantizar que el agua cumpla con los estándares de calidad requeridos para el consumo humano. Desde el punto de vista bacteriológico, los filtros tienen una eficiencia de remoción superior al 99%. Las partículas que se retienen en los granos del lecho filtrante varían en tamaño, desde flóculos de 1 mm hasta coloides, bacterias y virus con tamaños menores a 10^{-3} mm. Cuando el volumen del flóculo es mayor que el tamaño de los poros del lecho filtrante, queda retenido en los intersticios del lecho mediante cernido.

La filtración se compone de dos etapas complementarias principales. La primera es el transporte de partículas dentro de los poros, un fenómeno físico e hidráulico influenciado por

parámetros que controlan la transferencia de masas. Los mecanismos que facilitan este transporte incluyen cernido, sedimentación, intercepción, difusión, impacto inercial y acción hidrodinámica. La segunda etapa es la adherencia de partículas a los granos del medio filtrante, un fenómeno de acción superficial, influenciado por parámetros físicos y químicos.

Los sistemas de filtración se clasifican según varios parámetros, tales como el tipo de lecho filtrante (simple como arena o antracita, o lechos dobles o múltiples), el sentido del flujo (descendente, ascendente o combinado), la forma de aplicar la carga de agua sobre el lecho (a gravedad o a presión) y la forma de control operacional (tasa constante y nivel variable, tasa constante y nivel constante, o tasa declinante).

Los factores que influyen en el proceso de filtración incluyen las características de la suspensión (tipo, tamaño, densidad, dureza o resistencia de las partículas suspendidas, temperatura del agua a filtrar y concentración de partículas en el afluente), las características del medio filtrante (tipo, granulometría, peso específico del material y espesor de la capa filtrante), y las características hidráulicas (tasa de filtración, carga hidráulica disponible, método de control de los filtros y calidad del efluente). (Chulluncuy Camacho, 2011)

Desinfección: La desinfección es el último proceso en el tratamiento del agua, cuyo objetivo principal es la eliminación selectiva de los organismos patógenos potencialmente infecciosos. Sin embargo, no todos los microorganismos patógenos son completamente eliminados en esta etapa, por lo que se requiere la aplicación de procesos previos, como la coagulación, sedimentación y filtración, para reducir la carga microbiológica del agua antes de su desinfección.

Entre los factores que afectan la eficacia de la desinfección se encuentran: los microorganismos presentes y su comportamiento, la naturaleza y concentración del agente desinfectante, la temperatura del agua, la naturaleza y calidad del agua, el pH del agua y el tiempo de contacto con el agente desinfectante.

La efectividad del proceso de desinfección se mide en función del porcentaje de organismos muertos dentro de un tiempo determinado, a una temperatura y pH específicos. La resistencia de los microorganismos varía, siendo las esporas bacterianas las más resistentes, seguidas de

los quistes de protozoarios, virus entéricos y, finalmente, las bacterias vegetativas (como los coliformes). La presencia de sólidos en el agua puede disminuir la eficacia de la desinfección, ya que los organismos asociados a estos sólidos pueden quedar protegidos de la acción del agente desinfectante, ya sea físico o químico.

Los agentes desinfectantes más utilizados incluyen tanto productos químicos como físicos. Entre los agentes químicos destacan el cloro, el bromo, el yodo, el ozono, el permanganato de potasio, el agua oxigenada y los iones metálicos. El cloro es el desinfectante químico más común debido a su facilidad de aplicación, manejo sencillo y bajo costo. Se puede utilizar en forma de gas, líquido o sal (hipoclorito de sodio), y su efecto residual ayuda a proteger el agua contra contaminaciones en las redes de distribución. No obstante, es importante tomar precauciones en su uso, debido a que la formación de trihalometanos, subproductos de la desinfección, puede ser potencialmente peligrosa. La Agencia para la Protección del Ambiente de los Estados Unidos ha establecido un límite máximo permitido de 0,08 mg/l para los trihalometanos en agua potable. (Chulluncuy Camacho, 2011)

1.2.1. FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE SAN PEDRO

Se eligió la planta compacta de tratamiento de agua de San Pedro ubicada en la ciudad de Cuenca, ya que por su tamaño opera con rapidez, permitiendo un proceso eficiente en el tratamiento del agua. Su capacidad es de 15 litros por segundo. En la etapa inicial, el agua cruda ingresa a través de un vertedero donde se realiza la dosificación de sulfato de aluminio mediante un sistema de chorro controlado ilustrado en la figura 1.1.

Ilustración 1.1 Dosificación del sulfato de aluminio



Fuente: Etapa- Elaboración propia

El sistema de floculación está compuesto por dos floculadores equipados con agitadores mecánicos que funcionan a diferentes velocidades, diseñados para maximizar la eficiencia del proceso, figura 1.2. En el primer floculador, el agua se mezcla con sulfato de aluminio y un polímero, este último se introduce a través de una tubería ubicada en la parte inferior del tanque. Los agitadores, al operar a una velocidad controlada, facilitan la interacción inicial entre las partículas suspendidas y los productos químicos. Una conexión en la parte baja permite que el agua fluya hacia el segundo floculador, donde las revoluciones del agitador se reducen significativamente. Este cambio en la velocidad es crucial para que las partículas coagulen y formen flóculos más grandes, los cuales son visibles como una especie de neblina en el agua. En este punto, ya se ha logrado una mezcla uniforme entre el polímero y el sulfato de aluminio, consolidando el proceso de floculación

Ilustración 1.2. Agitadores mecánicos



Fuente: Etapa- Elaboración propia

Nota: floculadores mecánicos en el primer tanque

El agua tratada pasa por rebose hacia los sedimentadores. En esta etapa, el diseño del sistema permite que el flujo de agua ingrese por la parte inferior y ascienda lentamente. Durante este ascenso, los flóculos y sedimentos se depositan en unas plaquetas especialmente configuradas para retener las partículas más grandes, figura 1.3. Este diseño asegura que el agua salga clarificada por la parte superior de los sedimentadores, lista para continuar con el siguiente paso del tratamiento.

Ilustración 1.3. Sedimentadores



Fuente: Etapa- Elaboración propia

Nota: se puede observar el depósito de partículas en las plaquetas.

El agua ya clarificada a través de rebose pasa por unas canales en donde el agua pasa para ser filtrada. Se distribuye en 4 filtros y cada uno tiene sus válvulas de ingreso como se puede observar en la figura 1.4. El agua que sale de los filtros va hacia la cámara de contacto para la dosificación de cloro gas.

Ilustración 1.4. Filtros



Fuente: Etapa- Elaboración propia

Nota: filtros con sus respectivas válvulas

Además, la planta cuenta con tanques especialmente diseñados para la preparación de soluciones de sulfato de aluminio, un químico esencial en el proceso de coagulación. Cada tanque tiene una capacidad aproximada de 2 metros cúbicos, lo que permite la preparación de soluciones en cantidades adecuadas para la operación continua de la planta. Para preparar la solución, se mezclan 75 kilogramos de sulfato de aluminio con agua, y el sistema incluye un agitador que asegura la disolución completa del químico, figura 1.5. Una vez lista, la solución se transporta por gravedad hacia el sistema de dosificación

Ilustración 1.5. Sulfato de Aluminio



Fuente: Etapa- Elaboración propia

Nota: Preparación del sulfato de aluminio para la dosificación en la planta

2. CAPITULO 2 DISEÑO DE LA PLANTA COMPACTA

El diseño de una planta compacta para el tratamiento de agua potable representa un desafío técnico y logístico en contextos donde el espacio disponible es reducido y los recursos deben ser aprovechados al máximo.

Las plantas compactas han cobrado relevancia en escenarios donde la expansión de infraestructura convencional es inviable, ya sea por limitaciones de espacio o presupuesto. Al integrar unidades de tratamiento en módulos compactos, se garantiza una operación eficiente en términos hidráulicos y de mantenimiento, sin sacrificar la calidad del agua producida. Además, estas plantas permiten su adaptación y ampliación según las necesidades de caudal o los cambios en la demanda poblacional.

El presente capítulo aborda el diseño de una planta compacta con medidas optimizadas para caudales pequeños, así como la propuesta de materiales y configuración que aseguran la durabilidad y eficiencia del sistema. El objetivo es proporcionar un enfoque práctico y fundamentado para el desarrollo de infraestructura potable en condiciones de espacio limitado.

Se utilizó como base para los cálculos el libro de diseño de plantas de tratamiento de (Romero Rojas, 2006).

2.1 DISEÑO CON MEDIDAS OPTIMIZADAS PARA CAUDALES PEQUEÑOS

2.1.1 DISEÑO DE LA MEZCLA RÁPIDA CON RESALTO HIDRÁULICO

La mezcla rápida puede darse por mezcladores mecánicos o por mezcladores hidráulicos, los mecánicos son a través de agitadores o turbinas como en el caso de la planta modelo de San Pedro; el mezclador hidráulico se consigue con un resalto hidráulico que es el que se optó para el diseño de la planta con medidas optimizadas.

Se tiene que el caudal de la planta debe ser de 5 litros por segundo, se tomó un valor típico de pendiente de 0.005, pendiente suave recomendada par canales de concreto, rugosidad de

Manning de 0.014 para canal revestido de concreto o de PVC, se asumió un ancho para el canal de 0.12 m tomando en cuenta para el caudal que se planea diseñar, con ello se realizaron tres iteraciones para obtener la altura necesaria para el caudal con la ecuación 2.1. Los resultados de las iteraciones se pueden observar en las siguientes tablas, tablas 2.1, tabla 2.2 y tabla 2.3 que es la que se tomó para el diseño.

Ecuación 2.1. Manning

$$Q = \frac{A^{5/3} S_o^{1/2}}{n P^{2/3}}$$

Donde:

Q= Caudal

A= Área de la sección transversal del canal.

So= Pendiente del fondo del canal.

n= Coeficiente de rugosidad de Manning.

P= Perímetro mojado.

Tabla 2.1 Flujo uniforme iteración 1

FLUJO UNIFORME		
Q	0,005	m3/s
B	0,12	M
y	0,06	M
Área	0,009	m2
So	0,005	
n	0,014	
P	0,278	

Tabla 2.2 Flujo Uniforme Iteración 2

FLUJO UNIFORME		
Q	0,005	m3/s
B	0,12	M
y	0,07	M
Área	0,009	m2
So	0,005	
n	0,014	
P	0,278	

Tabla 2.3 Flujo Uniforme Iteración 3

FLUJO UNIFORME		
Q	0,005	m3/s
B	0,12	M
y	0,08	M
Área	0,009	m2
So	0,005	
n	0,014	
P	0,278	

Cuando hay resalto la profundidad inicial del agua debe estar relacionado con la altura crítica, esta relación se determina con la ecuación de la pérdida de la energía, ecuación 2.2. Las alturas antes y después del resalto están relacionadas entre sí y se obtiene con la ecuación 2.3. Por último, para la longitud del resalto se utiliza la ecuación 2.4. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2.4.

Ecuación 2.2 Pérdida de la energía

$$z + y_0 + \frac{v_0^2}{2g} = y_1 + \frac{v_1^2}{2g}$$

Donde:

z= Cota o altura del fondeo del canal

y₀= tirante inicial antes del resalto.

v₀= velocidad antes del resalto.

y₁= tirante después del resalto.

v₁= velocidad después del resalto.

g= gravedad.

Ecuación 2.3 Relación de alturas en el resalto hidráulico

$$(y_1 * y_2) * (y_1 + y_2) = \frac{2q^2}{g}$$

Donde:

y₁= tirante antes del resalto

y₂= tirante después del resalto

q= caudal

g= gravedad

Ecuación 2.4 Longitud de resalto hidrúlico

$$L_R = 9,75 * 0,09(4,81 - 1)^{1,01}$$

Donde:

LR= longitud del resalto hidráulico

Tabla 2.4. Resultados resalto hidráulico y alturas conjugadas

Resalto y alturas conjugadas		
z	0,12	M
y	0,12	M
V	0,35	m/s
y1	0,014	M
V1	3,00	m/s
Fr	65,40	
Fr	8,09	resalto estable
q	0,042	m ² /s
y2	0,15	M
Lr	0,99	M

Fuente: Elaboración propia

Por último, se determinó la velocidad media de permanencia, la pérdida de energía del resalto y la gradiente de velocidad con las siguientes ecuaciones, ecuación 2.5 para la velocidad media, ecuación 2.6 para la pérdida del resalto y la ecuación 2.7 para la gradiente de velocidad. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2.5.

Ecuación 2.5 Velocidad media en el resalto

$$v_m = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

Donde:

vm= velocidad media en el resalto

v1= velocidad antes del resalto

v2= velocidad después del resalto.

Ecuación 2.6 Pérdida del resalto

$$H = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_2y_1}$$

Donde:

H= pérdida de energía específica

y1= tirante antes del resalto

y2= tirante después del resalto.

Ecuación 2.7 Gradiente de velocidad

$$G = \sqrt{\frac{\gamma \cdot H}{\mu \cdot t}}$$

Donde:

G= Gradiente de velocidad

y= peso específico del agua

H= pérdida de energía específica

u= viscosidad dinámica del agua

t= tiempo de mezcla

Tabla 2.5. Resultados velocidad media, perdida del resalto y gradiente de velocidad

Velocidad media y tiempo de contacto	1,64	m/s
	0,60	s
Pérdida del resalto	0,31	
Gama	9800	
Viscosidad	0,001307	
Gradiente de velocidad	1978	entre 1000 y 2000 para buena mezcla rápida

Fuente: Elaboración propia

2.1.2 DISEÑO DE FLOCULADORES MECÁNICOS

Existen dos tipos de mezcla para la floculación, floculadores hidráulicos de flujo horizontal y vertical y los floculadores mecánicos que está constituido por un agitador de paletas horizontales de mezcla lenta al cual se le introduce cierta potencia para el agua, para el diseño de estos agitadores mecánicos se debe tomaren cuenta el periodo de agitación y la intensidad de la mezcla.

Para el diseño de la planta primero de analizo la planta modelo de San Pedro con las ecuaciones y criterios de diseño del libro de diseño de plantas de tratamiento de (Romero Rojas, 2006).

La planta de San Pedro cuenta con una serie de dos etapas, las medidas de las cámaras son de 1,8 m de ancho, 1,9 m de largo y 2,82 m de profundidad. Según los criterios analizados en el libro se tomaron en cuentas dos gradientes para el cálculo de la potencia de los agitadores de $90s^{-1}$ y $75s^{-1}$ en conjunto con la ecuación 2.8.

De la misma forma el cálculo de la potencia de los agitadores mecánicos de la planta a diseñar se tomó en cuenta gradientes de $50s^{-1}$ y $30s^{-1}$ por lo que las medidas y caudal de la planta son menores, las medidas de la planta se obtuvieron a través de una relación con las medidas de la planta modelos de las cuales se obtuvo 1,1 m de ancho, 1,1 m de largo y 2,65m de profundidad. Los resultados se pueden observan en la tabla 2.6.

Como criterio de diseño para las paletas de los agitadores su área transversal debe estar en un rango entre el 10% y el 25% del área de la sección.

Ecuación 2.8 Potencia disipada

$$P = G^2 * V * \mu$$

Donde:

P= Potencia disipada

G^2 = Gradiente de velocidad

V= Volumen

u= viscosidad dinámica del agua

Tabla 2.6. Resultados floculadores

FLOCULADORES PLANTA DISEÑO		
1 serie 2 etapas		
Ancho	1,1	
Largo	1,1	
Área	1,14	m2
Área tanque	1,21	m2
Q	5	lt/s
	0,05	m3/s
Profundidad	2,65	
Volumen	3,21	m3
Volumen	3,21	m3
g	50	s-1
	30	s-1
Área floculadores	0,3025	m2
Potencia con gradiente de 90s	2,00	W
Potencia con gradiente de 75s	0,72	W
con eficiencia de 80%		
Potencia con gradiente de 90s	2,51	W
Potencia con gradiente de 75s	0,90	W
Motores	0,003	kw
	0,001	kw

Fuente: Elaboración propia

Para la abertura del orificio entre los tanques se toma en cuenta la recomendación de que el área de abertura debe estar entre el 2% y 10% de la sección transversal, y para la abertura de los agitadores se debe tener en cuenta que tiene que ser del 25% del área de los floculadores esto se encuentra en la tabla 2.7

Tabla 2.7. Resultados abertura en pantalla

Velocidad	0,01	m/s
Abertura en pantallas	1,4575	m ²
Verificacion de abertura en pantallas	11,00	%
Abertura en pantallas corregida	0,55	m ²
Aspas		
Largo	2	m
Ancho	0,09	m
Area de 1 aspa	0,18	m ²
Area de los agitadores	0,72	

Fuente: Elaboración propia

2.1.3. DISEÑO DE SEDIMENTADORES

Después del proceso de floculación, el agua ingresa a la unidad de decantación, cuyo propósito es favorecer la sedimentación de partículas coloidales mediante la acción de la gravedad. Para lograrlo, es fundamental reducir la velocidad del flujo dentro del tanque. Se recomienda que esta unidad tenga una forma rectangular y que su fondo presente una inclinación hacia el centro, facilitando así la recolección y evacuación de los sólidos sedimentados.

Dentro del decantador, las partículas experimentan dos fuerzas principales: una fuerza horizontal generada por la velocidad del flujo del agua y una fuerza vertical asociada a su peso. Estas dos componentes provocan que el movimiento de las partículas dentro de la

unidad adopte una trayectoria parabólica. Si este es el único movimiento presente, el tiempo requerido para que una partícula llegue al fondo del decantador será igual al tiempo que el agua tarda en atravesarlo. Este tiempo de residencia puede determinarse dividiendo el volumen útil del tanque entre el caudal de tratamiento. (Arellano, 2022)

Para el diseño de los sedimentadores se ha considerado la Ley de Stokes, la cual describe el comportamiento de partículas esféricas en caída libre dentro de un fluido viscoso bajo régimen laminar. Esta ley permite estimar la velocidad terminal de sedimentación de partículas discretas, constituyendo una herramienta fundamental en el dimensionamiento de unidades de sedimentación cuando las condiciones del flujo lo permiten, para ello se utilizó la ecuación 2.9.

Ecuación 2.9 Velocidad de sedimentación

$$V_s = \frac{g * (P_p - P_f) * d^2}{18 * \mu}$$

Donde:

V_s = Velocidad de sedimentación de la partícula

g = aceleración de la gravedad

P_p = densidad de la partícula

P_f = densidad del fluido

d = diámetro de la partícula

μ = viscosidad dinámica del fluido

Para la aplicación válida de esta ecuación deben cumplirse ciertas condiciones:

- Las partículas deben tener forma aproximadamente esférica.
- El movimiento debe ocurrir bajo régimen laminar, lo que implica que el número de Reynolds asociado a la partícula debe ser menor a uno ($Re < 1$).
- La sedimentación debe ser de tipo discreta, es decir, que las partículas no interactúan entre sí ni generan efectos colectivos en el medio.

Bajo estos supuestos, la Ley de Stokes proporciona una estimación confiable de la velocidad de caída de partículas finas en suspensión, y permite, por tanto, establecer el tiempo de residencia y las dimensiones mínimas requeridas.

El diámetro asumido de la partícula representa un tamaño típico de partícula fina (como arcillas o coloides floculados) cuya sedimentación bajo régimen laminar puede ser descrita con precisión mediante esta ley. Es importante recordar que, si se trabaja con partículas más grandes, el régimen de flujo puede dejar de ser laminar y la Ley de Stokes ya no sería válida.

El valor de la densidad de la partícula corresponde a la densidad del cuarzo o arena silícea, un material comúnmente presente en procesos de tratamiento de aguas o sedimentación natural.

La densidad del fluido es un valor convencional de la densidad del agua a temperatura ambiente (aproximadamente 20 °C). Se trata de una constante ampliamente aceptada en el análisis de procesos hidráulicos y de sedimentación.

Se calculó la velocidad de ascenso como criterio de comparación con la velocidad de sedimentación que representa la velocidad mínima de una partícula para poder sedimentarse y asegurara la eficiencia del proceso de sedimentación, por lo que esta debe ser menor a la velocidad de sedimentación calculada inicialmente. Los resultados obtenidos se pueden observar en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Velocidad de sedimentación y velocidad de ascenso

Velocidad de sedimentación		
Ley de stokes		
Gravedad	9,81	m/s ²
Diámetro de la particular	0,0001	m
Densidad del solido	2650	kg/m ³
Densidad del agua	1000	kg/m ³
Viscosidad dinamica del agua	0,001	pascal/s

Velocidad de sedimentacion	0,009	m/s
Velocidad de asenso	0,0071	m/s

Fuente: Elaboración propia

El dimensionamiento del área correspondiente a las placas inclinadas, de 60°C como recomendación, en los sedimentadores se realizó considerando las dimensiones comerciales disponibles en el mercado, tomando como base el ancho efectivo del sedimentador. El número de placas requeridas fue determinado a partir de la separación calculada entre placas, en función de criterios hidráulicos y de sedimentación, y la anchura total del canal o módulo del sedimentador.

Una vez definido el número de placas, se procedió al cálculo del área proyectada, la cual corresponde a la proyección horizontal de la superficie total de las placas inclinadas. Esta área proyectada constituye, en términos prácticos, el área útil de sedimentación, ya que representa la superficie efectiva sobre la cual las partículas pueden asentarse por gravedad. Cabe destacar que esta área no debe confundirse con el área en planta del sedimentador, puesto que esta última incluye zonas no activas para la remoción de sólidos.

A continuación, se procede al cálculo de los tiempos característicos del proceso de sedimentación, fundamentales para evaluar la eficiencia hidráulica del sedimentador. En primer lugar, se determinó el tiempo de residencia en el área de sedimentación, el cual depende de la velocidad del flujo dentro del sedimentador. Esta velocidad debe mantenerse por debajo de 0.01 m/s (equivalente a 1 cm/s), con el fin de evitar la re suspensión de partículas y garantizar que aquellas con velocidad de sedimentación suficiente logren asentarse adecuadamente.

Posteriormente, se calculó el tiempo de tránsito del agua a lo largo del sedimentador, el cual representa el tiempo total que el fluido permanece dentro de la unidad. Para que el proceso de remoción de sólidos sea efectivo, este tiempo de tránsito debe ser mayor que el tiempo de residencia en el área de sedimentación, asegurando así que las partículas tengan oportunidad suficiente para sedimentar antes de alcanzar la zona de salida del efluente.

Los resultados obtenidos de área y los tiempos de sedimentación se pueden observar en la tabla 2.9.

Tabla 2.9. Área y tiempos de sedimentación

Área y tiempos de sedimentación		
Numero de placas	20	
Separación entre placas	0,75	m
Separacion recomendada	0,06	m
Área por placa	2,88	m ²
Area proyectada en el sedimentador	0.41	m ²
Velocidad de flujo en el sedimentador	0,0071	m/s
	0,707	cm/s
Tiempo en el área de sedimentación	169,63	s
	2,83	min
Tiempo de tránsito de agua	1209,60	s
	20,16	min
L	20	

Fuente: Elaboración propia

2.1.4 DISEÑO DE FILTRACIÓN

La filtración es una de las etapas finales en el proceso de potabilización del agua y tiene como objetivo remover partículas suspendidas finas, flóculos residuales, microorganismos y otros contaminantes que no fueron eliminados en las etapas anteriores (como la sedimentación). El proceso consiste en hacer pasar el agua a través de un medio poroso —generalmente compuesto por capas de arena, grava y, en algunos casos, carbón activado— que actúa como barrera física y biológica.

Para asegurar un funcionamiento adecuado del filtro, es necesario que la velocidad aplicada durante el retro lavado supere la velocidad mínima requerida para provocar la fluidización del lecho filtrante. (Arellano, 2022)

Para el diseño de los filtros se tomó en cuenta el caudal total, la viscosidad dinámica del agua, la carga superficial normal y máxima, la porosidad de la arena, ancho de la canaleta, borde de la canaleta, tiempo de lavado y carrera del filtro que se muestran a continuación en la tabla 2.10.

Tabla 2.10. Datos planta de diseño

Filtración planta diseño		
Caudal	5	l/s
	0,005	m ³ /d
Viscosidad dinámica del agua	1,271	cp
	11	°C
Carga superficial cs	180	m/d
Cs max	240	m/día
Porosidad de la arena	0,45	
Ancho de la canaleta	0,3	
Tiempo de lavado del filtro	10	min
Carrera del filtro	24	h
Borde libre de la canaleta	0,1	m

Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos generales, se procedió a calcular el caudal de diseño el cual representa el volumen de agua que deberá ser tratado por cada unidad en condiciones máximas operativas con la ecuación 2.9, el área de filtración la cual asegura que el flujo a través del filtro se mantenga dentro de los rangos adecuados para una remoción eficiente de sólidos sin

comprometer la integridad del medio filtrante ni la calidad del efluente mediante la ecuación 2.10 y la velocidad de arrastre que permite verificar que el flujo en canales o estructuras previas al tratamiento no favorezca la sedimentación prematura de sólidos gruesos utilizando la ecuación 2.11.

Ecuación 2.9 Caudal de diseño

$$Q_{\text{diseño}} = \frac{Q}{n} * 86.4$$

Donde:

Q= caudal total que debe ser tratado por la planta

n = número de filtros

86.4= Factor conversión de l/s a m³/día

Ecuación 2.10 Área de filtración

$$A_f = \frac{Q_d}{n * C_s}$$

Donde:

A_f= Área de filtración

Q_d= Caudal de diseño

n= Numero de filtros

C_s= Carga superficial

Ecuación 2.11 Velocidad de arrastre para la arena

$$V_a = 10 * D_{60}$$

Donde:

V_a= Velocidad mínima de flujo

D₆₀= Diámetro efectivo

10= Coeficiente empírico

Después se prosigue a establecer la velocidad adecuada de lavado del filtro, para ello es necesario calcular previamente la velocidad de fluidización, dicha velocidad representa el valor mínimo requerido para que el lecho granular se expanda de manera uniforme, permitiendo así una limpieza efectiva del medio utilizando la ecuación 2.12, la velocidad de lavado se define como el 10 % de la menor velocidad de arrastre considerada en el diseño. No obstante, esta debe ser superior a la velocidad de fluidización correspondiente a las condiciones más desfavorables ocupando las ecuaciones 2.13 y 2.14.

Ecuación 2.12 Velocidad de fluidización

$$V_f = V_a * (\text{porosidad})^{4.5}$$

Donde:

V_f = Velocidad de fluidización

V_a = Velocidad de arrastre

4.5= Coeficiente empírico

Ecuación 2.13 Velocidad de lavado a 20°C

$$V_{l1} = 0.10 * V_a$$

Donde:

V_{l1} = Velocidad de lavado

0.10= Coeficiente empírico

V_a = Velocidad de arrastre

$$V_{l1} = 0.10 * V_a$$

Ecuación 2.14 Velocidad de lavado a 11°C

$$V_l = \frac{V_{l1}}{\sqrt[3]{\mu}}$$

Donde:

V_l = Velocidad de lavado corregida

V_L = Velocidad de lavado

μ = Viscosidad dinámica del agua

Para el diseño de las canaletas de lavado se ocupa el caudal de lavado que corresponde al volumen de agua requerido para efectuar el lavado del medio filtrante y se calcula en función del área del filtro y la velocidad de lavado determinada previamente mostrado en la ecuación 2.15, la lámina de agua de la canaleta misma que representa la profundidad media del flujo que circula por la canaleta durante el lavado ocupando la ecuación 2.16 y la altura total de la canaleta misma que define la geometría vertical de la canaleta y permite su correcta integración estructural en el sistema de filtración usando la ecuación 2.17.

Ecuación 2.15 Caudal de lavado

$$Q_L = V_L * A_f$$

Donde:

Q_L = Caudal de lavado

V_L = Velocidad de lavado

A_f = Área de filtración

Ecuación 2.16 Lámina de agua de la canaleta

$$Q = 1.375 * b * h_o^{\frac{3}{2}}$$

Donde:

Q = Caudal de lavado

1.375 = Coeficiente empírico

b = Ancho de la canaleta

h_o = Lámina de agua de la canaleta

Ecuación 2.17 Altura total de la canaleta

$$h_t = h_o + B_L$$

Donde:

ht= Altura total de la canaleta

ho= Lámina de agua de la canaleta

BL= Borde libre de la canaleta

Finalmente se calculó el área de los filtros, el volumen de agua para lavar el filtro, el volumen filtrado en un día y el porcentaje de lavado, para ello se utilizaron las ecuaciones 2.18, 2.19 y 2.20.

Ecuación 2.18 Volumen de lavado

$$Vl = QL * t1$$

Donde:

Vl= Volumen de lavado

QL= Caudal de lavado

t1= Tiempo de lavado del filtro

Ecuación 2.19 Volumen filtrado en un día

$$Vf = Qd * CF$$

Donde:

Vf= Volumen filtrado

Qd= Caudal de diseño

CF= Carrera de filtro

Ecuación 2.20 Porcentaje de lavado

$$XL = \frac{Vl * 100\%}{Qd}$$

Donde:

XL= Porcentaje de agua del lavado

VI= Velocidad de lavado

Qd= Caudal de diseño

A continuación, en la tabla 2.11 se muestran los resultados obtenidos del diseño de filtración para la planta de diseño.

Tabla 2.11. Resultados del filtro planta diseño

Qdiseño	0,0025	m3/dia
	0,216	m3/dia
V. arrastre arena	7	m/min
Velocidad de fluidizacion	0,19	m/min
Velocidad de lavado (20 °c)	0,7	m/min
Velocidad corregida 11c	0,65	m/min
Diseño de las canaletas de lavado		
Caudal de lavado	0,005	m3/s
Lámina de agua de la canaleta	0,04	m
Altura total de la canaleta	0,14	m
Volumen de agua para lavar el filtro	3.26	m3
Volumen filtrado en un día	0,005	m3
% Agua de lavado	2,99	%
1 filtro		
Area1	0,50	m2
area2	0,6222	m3
h	0,75	
L	0,85	
a	0,68	

Fuente: Elaboración propia

2.2. PROPUESTA DE MATERIALES Y CONFIGURACIÓN

El presupuesto referencial contempla los costos estimados para la ejecución integral de la planta compacta de tratamiento de agua potable, considerando actividades constructivas, instalaciones hidráulicas, electromecánicas y adquisición de equipos. Los rubros incluidos se han estructurado conforme a las partidas necesarias para la implementación funcional y operativa del sistema.

En la fase preliminar se contempla el replanteo y nivelación de áreas, así como la excavación mecánica en suelo conglomerado. Para la estructura de los sedimentadores, filtros y edificaciones auxiliares se considera la utilización de hormigón según el requerimiento estructural, así como acero de refuerzo debidamente cortado y doblado.

En la línea hidráulica se incluyen accesorios y válvulas, tales como válvulas mariposa, compuertas, codos, bridas, tuberías PVC para desagüe y tuberías de HDPE, aluminio o acero inoxidable para conducción y recolección. El sistema de filtración contempla la provisión y colocación de materiales filtrantes, como grava y arena, así como el enlucido impermeabilizado de los filtros.

Adicionalmente, el presupuesto considera la construcción de casetas para químicos, cloración y guardianía, con sus respectivas instalaciones. Finalmente, se incluyen equipos mecánicos, como bombas dosificadoras de polímero tipo rotor helicoidal, con caudal variable, adecuadas para garantizar la operación continua y automatizada del sistema.

Los precios unitarios empleados fueron tomados de fuentes oficiales y catálogos técnicos, considerando cantidades de obra basadas en el diseño ejecutivo. Este presupuesto tiene carácter referencial y servirá como base para la planificación técnica y financiera del proyecto.

Tabla 2.12 Presupuesto referencial planta compacta

PRESUPUESTO REFERENCIAL DE CONSTRUCCION						
ITEM	CODIGO	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO EN DOLARES	P. TOTAL EN DOLARES
1		MEZCLA RAPIDA Y FLOCULADORES				
1.01	520014	Replanteo y nivelación de áreas	m2	5,157	1,81	9,33
1.02	506050	Hormigón Simple 240 Kg/cm2	m3	1,25	191,88	239,85
1.03	540425	Sum,-Ins, Perfilera de acero inoxidable	m	33,95	4,46	151,42
1.04		Agitador Vertical, potencia 0,25kW/4 polos/220V/30Hz/IP55/IE3, Longitud Eje 1200mm, Turbina Axial de 4 patas 1000mm	u	2	1109,83	2219,66
2		SEDIMENTADORES				
2.01	506050	Hormigón Simple 240 Kg/cm2	m3	2,288	191,88	439,02
2.02	535865	Sum,-Ins, Perfilera de acero inoxidable	m	44,22	4,46	197,2212
2.03		Sum,-Ins, Placas ABS, 2,40 x 1,20 x 0,008m	u	20	1045,19	20903,8
3		FILTROS DE ARENA				
3.01	506050	Hormigón Simple 240 Kg/cm2	m3	0,72	191,88	137,19
3.02	516001	Acero de Refuerzo (Incluye corte y doblado)	m	15,80	2,69	42,50
3.03	507004	Enlucido 1:2 + Impermeabilizante	m2	0,72	7,61	5,44
		MATERIAL FILTRANTE				
3.04	540094	Sum, y colocacion Arena para filtro	m3	0,59	204,95	120,92
3.05	540095	Sum, y colocacion Grava para filtros	m3	0,44	64,55	28,402
		ACCESORIOS PARA FILTROS				
3.06	535853	Sum, Ins. Tubería HF o LA D=50 mm	u	6	15,02	90,12
3.07	535839	Sum, Ins. Valvula de compuerta 50mm	u	16		
4		CASETA DE QUIMICOS, DE CLORO Y GUARDIANIA				
4.01	506003	Hormigón Simple 240 Kg/cm2	m3	3,46	191,88	663,9048
		EQUIPOS Y ACCESORIOS				
4.02	535547	Sum. e inst. Dosificador volumétrico de tornillo para sulfato de aluminio. Incluye Tolva, Tanque de dilución, capacidad 300 mg/h	u	1	4.678,55	4.678,55
4.03	535543	Sum. e inst. Bomba de impulsión de sulfato de aluminio tipo centrifuga. Impulsor encerrado. HDT 10 mca. 0.75 HP	u	1	1443,39	1443,39
4.04	535541	Sum. Sistema de producción de Hipoclorito	u	1	1588	1588
4.05	535949	Sum. Tanque Hipoclorito 89 Kg	u	1	318,14	318,14
		TOTAL				33276,87

Fuente: Elaboración propia

3. CAPITULO 3: ANÁLISIS DE COSTOS DE CONSTRUCCION

El presente análisis de costos de construcción corresponde a la estimación técnica y económica preliminar de los recursos necesarios para la implementación de la planta compacta de tratamiento de agua potable propuesta en este proyecto. El análisis se elaboró con base en las cantidades de obra derivadas del diseño hidráulico, estructural y de instalaciones, así como en precios unitarios referenciales obtenidos de catálogos de proveedores especializados y experiencias previas en obras similares.

Las partidas principales consideradas se describen a continuación:

1. Movimiento de tierras

Incluye actividades como replanteo, nivelación y excavación mecánica en suelo conglomerado. Los costos consideran el uso de maquinaria pesada, operarios y transporte de material excedente.

2. Obra Civil

Considera la construcción de estructuras en hormigón simple de resistencias 210 kg/cm² y 240 kg/cm², en elementos como sedimentadores, filtros y casetas auxiliares. Se incluye el suministro e instalación de acero de refuerzo, enlucidos impermeabilizantes y acabados básicos.

3. Sistemas hidráulicos

Incorpora tuberías de PVC, HDPE o aluminio para conducción y drenaje, así como válvulas, bridas, compuertas, codos y accesorios especiales. Los costos se determinaron considerando tanto el suministro como la instalación de estos componentes.

4. Sistemas Electromecánicos

Incluye la adquisición e instalación de bombas dosificadoras de polímero. Se evaluó el costo de equipos, soportes, conexiones y pruebas de funcionamiento.

5. Material Filtrante

Se consideró el suministro y colocación de arena y grava con granulometría adecuada, garantizando el correcto funcionamiento del sistema de filtración.

6. Obras Complementarias

Incluye la construcción de casetas para químicos, cloración y guardianía, con instalaciones básicas de infraestructura y seguridad.

3.1 Analizar los costos de construcción con recursos nacionales

El análisis de costos de construcción para la planta compacta de tratamiento de agua potable ha sido desarrollado considerando el uso predominante de recursos nacionales, con el objetivo de optimizar la disponibilidad, reducir los costos logísticos y fomentar la contratación de bienes y servicios dentro del territorio ecuatoriano.

La metodología empleada se basa en la utilización de precios unitarios referenciales publicados por el Servicio Nacional de Contratación Pública (SERCOP), así como en catálogos técnicos de fabricantes y proveedores locales de materiales de construcción, tuberías, válvulas, equipos hidráulicos y elementos estructurales.

Principales observaciones por categoría:

1. Materiales de Construcción

El hormigón, acero de refuerzo, tuberías de PVC y accesorios estándar están ampliamente disponibles en el mercado nacional. Empresas cementeras, siderúrgicas y de plásticos en Ecuador ofrecen productos certificados que cumplen con las normativas técnicas necesarias para obras hidráulicas y de saneamiento.

2. Mano de obra

Se considera la contratación de mano de obra calificada y no calificada local, lo que contribuye a reducir costos asociados al transporte y viáticos. Además, la experiencia de profesionales ecuatorianos en proyectos similares permite asegurar estándares adecuados de ejecución, especialmente en trabajos de fundición, instalación de equipos y montaje de redes hidráulicas.

3. Equipos y Sistemas Electromecánicos

Aunque ciertos equipos de dosificación o bombas especializadas son de origen importado, en el mercado ecuatoriano existen distribuidores oficiales y representantes técnicos que ofrecen soporte, garantías y repuestos locales. Esto permite incluir en el presupuesto precios

actualizados en moneda nacional y evita la dependencia directa de procesos de importación complejos.

4. Logística y Transporte

Al emplear insumos de origen nacional, se minimizan los costos de transporte a larga distancia, facilitando el abastecimiento oportuno en obra. En especial, los materiales pesados como grava, arena, hormigón premezclado o estructuras metálicas pueden ser adquiridos en las zonas cercanas al sitio de implantación del proyecto.

3.2 Resultados

El desarrollo del diseño de la planta compacta para tratamiento de agua potable permitió establecer parámetros hidráulicos, estructurales y operativos compatibles con caudales reducidos y condiciones de espacio limitado, características comunes en comunidades rurales o con infraestructura restringida. A partir del análisis técnico realizado en cada unidad del proceso, se obtuvieron resultados que permiten verificar la viabilidad funcional y constructiva del sistema.

En la etapa de mezcla rápida, se optó por un diseño con resalto hidráulico debido a su eficiencia energética. El cálculo del gradiente de velocidad, la pérdida de energía y la velocidad media obtenida evidencian que la mezcla cumple con los rangos adecuados para garantizar la coagulación química. Los valores del gradiente ($G \approx 1978 \text{ s}^{-1}$) se ubicaron dentro del intervalo recomendado para una mezcla rápida eficiente ($1000\text{--}2000 \text{ s}^{-1}$), lo cual garantiza una correcta dispersión del coagulante en el flujo de entrada.

En la unidad de floculación, se diseñó una configuración con dos cámaras de floculadores mecánicos en serie. El dimensionamiento y la potencia requerida de los agitadores se calcularon con base en gradientes de mezcla entre 30 y 50 s^{-1} , valores típicos para este tipo de operación. Se comprobó que la potencia disipada es adecuada para mantener una mezcla lenta sin romper los flóculos formados, optimizando el rendimiento en la etapa de sedimentación.

Para los sedimentadores, se aplicó la Ley de Stokes como base para el cálculo de la velocidad de sedimentación de partículas finas. El resultado obtenido (0.009 m/s) fue superior a la velocidad de ascenso (0.0071 m/s), lo que, valida la eficiencia del diseño, dado que las

partículas con esa velocidad de caída lograrán sedimentarse antes de alcanzar la salida del tanque. Además, se comprobó que el tiempo de tránsito del agua dentro de la unidad (20.16 minutos) es mayor que el tiempo de residencia en el área útil de sedimentación (2.83 minutos), lo cual garantiza que se cumple con el principio de remoción hidráulica.

En la etapa de filtración, se analizaron variables como el caudal, la viscosidad del agua, la porosidad del medio y las condiciones de operación de lavado. La velocidad de lavado corregida (0.65 m/min) resultó superior a la velocidad de fluidización (0.19 m/min), lo cual asegura que el retro lavado es suficiente para expandir el lecho y eliminar los sólidos retenidos. Asimismo, se verificó que el porcentaje de agua utilizada en el lavado es del 2.99 %, valor aceptable dentro de los márgenes operativos establecidos para este tipo de sistemas.

Para el diseño de las canaletas, se obtuvieron dimensiones adecuadas (0.3m*0.14m) para conducir el caudal de lavado sin desbordes, cumpliendo con los criterios de borde libre y capacidad hidráulica. Este componente, aunque secundario, garantiza la operación continua y segura del sistema de filtración.

En cuanto a la infraestructura, se propuso el uso de hormigón armado de 210 y 240 kg/cm² y acero de refuerzo en las estructuras principales, así como el uso de materiales filtrantes (arena y grava) y tuberías PVC o HDPE para conducción. Se incluyó además la instalación de canaletas hidráulicas de 0,3 m de ancho por 0,14 m de altura, válvulas, bombas dosificadoras y casetas operativas.

El análisis de costos demostró que el sistema puede implementarse con insumos locales, utilizando precios referenciales del SERCOP y catálogos técnicos. Las partidas presupuestarias incluyeron movimiento de tierras, obra civil, instalaciones hidráulicas y electromecánicas, con una planificación que permite optimizar recursos y reducir costos de transporte y adquisición.

Finalmente, el diseño presentado no solo es técnicamente viable, sino que también es adaptable, sostenible y replicable para otras comunidades que enfrentan restricciones similares. La propuesta promueve el uso de tecnologías apropiadas, accesibles y de fácil

mantenimiento, fortaleciendo la gestión local del recurso hídrico y el acceso a agua potable segura.

3.2.1 Discusiones

El diseño de una planta compacta para el tratamiento de agua potable, adaptado a caudales pequeños (5 l/s), responde a una necesidad real en comunidades rurales y periurbanas de Ecuador, donde las soluciones convencionales resultan costosas y de difícil implementación. A lo largo del proyecto se logró demostrar que, mediante una adecuada aplicación de criterios hidráulicos y el uso de materiales locales, es posible obtener un sistema eficiente, económico y adaptable.

En la etapa de mezcla rápida, el uso de un resalto hidráulico en lugar de un sistema mecánico representó una alternativa eficiente y de bajo consumo energético. Este diseño cumple con el objetivo de maximizar la eficiencia del proceso sin requerir componentes electromecánicos costosos. La elección de este sistema fue validada al compararse con parámetros técnicos aceptados (gradiente de 1978 s^{-1}), lo cual demuestra que las tecnologías pasivas pueden ser igual de efectivas si están bien dimensionadas.

La floculación mecánica en dos etapas, con agitadores de baja potencia, refleja un equilibrio entre eficiencia del proceso y viabilidad operativa. Al reducir los gradientes de mezcla a 50 s^{-1} y 30 s^{-1} , se optimiza la formación de flóculos sin deteriorarlos, mejorando así la eficiencia de la sedimentación posterior. Este diseño toma como referencia el funcionamiento de la planta modelo de San Pedro, y lo adapta a un caudal tres veces menor, manteniendo criterios técnicos similares.

Los sedimentadores inclinados, diseñados con base en la Ley de Stokes, evidencian un comportamiento favorable del flujo y la remoción de sólidos. La velocidad de sedimentación mayor a la de ascenso y los tiempos de residencia superiores al mínimo requerido confirman la eficiencia hidráulica del sistema. Comparado con plantas comerciales o modelos industriales, este diseño logra resultados similares a un costo mucho menor y con mayor facilidad constructiva.

En cuanto a los filtros, el diseño considera aspectos fundamentales como la velocidad de fluidización, el volumen de agua lavado y el tiempo de carrera. El hecho de que el sistema requiera apenas un 2,99 % del volumen filtrado diario para su lavado representa un indicador clave de eficiencia operativa. Además, se garantiza que las canaletas de lavado diseñadas cumplan con los requerimientos hidráulicos para evitar pérdidas o desbordes.

Desde una perspectiva económica, el análisis de costos demuestra que es viable construir una planta compacta funcional utilizando materiales y equipos disponibles en el mercado nacional. El diseño se adapta a las condiciones locales, con partidas detalladas para obras civiles, sistemas hidráulicos y equipos, manteniendo un enfoque de sostenibilidad financiera. Este enfoque puede replicarse en otras comunidades, generando una solución descentralizada para el abastecimiento de agua potable.

Finalmente, el proyecto contribuye al enfoque de desarrollo sostenible, al promover soluciones tecnológicas accesibles, adaptables y con bajo impacto ambiental. Se fortalece la autonomía de las comunidades en la gestión del recurso hídrico, mediante sistemas que pueden ser operados y mantenidos localmente. El diseño presentado, por tanto, no solo representa una solución técnica, sino también una propuesta socialmente pertinente y ambientalmente responsable.

ANEXOS

Anexo 1 Floculadores planta San Pedro

FLOCULADORES PLANTA MODELO		
1 serie 2 etapas		
Datos		
Ancho	1,8	m
Largo	1,9	m
Area Tanque	3,42	m ²
Profundidad	2,82	
Volumen	9,64	m ³
Q	15	l/s
	0,015	m ³ /s
G	90	s ⁻¹
	75	s ⁻¹
Area floculadores	1,71	m ²
Potencia con gradiente de 50s	39,06	W
Potencia con gradiente de 30s	27,12	W
Velocidad	0,0088	m/s
Abertura en pantallas	0,9	m ²
Verificacion de abertura en pantallas	16,84	%
Abertura en pantallas corregida	0,51	m ²

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2 Sedimentadores planta San Pedro

SEDIMENTADORES PLANTA MODELO		
Ancho	1,2	m
Largo	4,8	m
Profundidad 1	3,15	m
Area	5,76	m ²
Caudal	0,015	m ³ /s
Ancho del sedimentador	1,2	
Longitud placas	1,2	m
Separacion entre placas	0,25	m
	0,06	m
Coeficiente placa sc	1	
Angulo de inclinacion	60	grados
Cs	0,0013	m/s
Zona de entrada	0,0038	m/s
Zona de salida	6,25	l/s/m
Altura de canaleta	0,11	m
Zona de lodos		
Volumen de zona de lodos	6,2331	m ³
Volumen de zona de sedimentacion	1,728	m ³
Vlodos>0,5*Vsed	0,864	m ³
Velocidad de sedimentacion		

Ley de stokes		
Gravedad	9,81	m/s ²
Diametro de la particular	0,0001	m
Densidad del solido	2650	kg/m ³
Densidad del agua	1000	kg/m ³
Viscocidad dinamica del agua	0,001	Pascal/s
Velocidad de sedimentacion	0,009	m/s
Velocidad de asenso	0,0061	m/s
Area y tiempos de sedimenatcion		
Numero de placas	20	
Separacion entres placas	0,25	m
	0,06	m
Area por placa	2,88	m ²
Area proyectada en el sedimentador	1,22	m ²
Velocidad de flujo en el sedimentador	0,0071	m/s
	0,707	cm/s
Tiempo en el area de sedimentacion	169,63	s
	2,83	min
Tiempo de transito de agua	1209,60	s
	20,16	min
L	20	

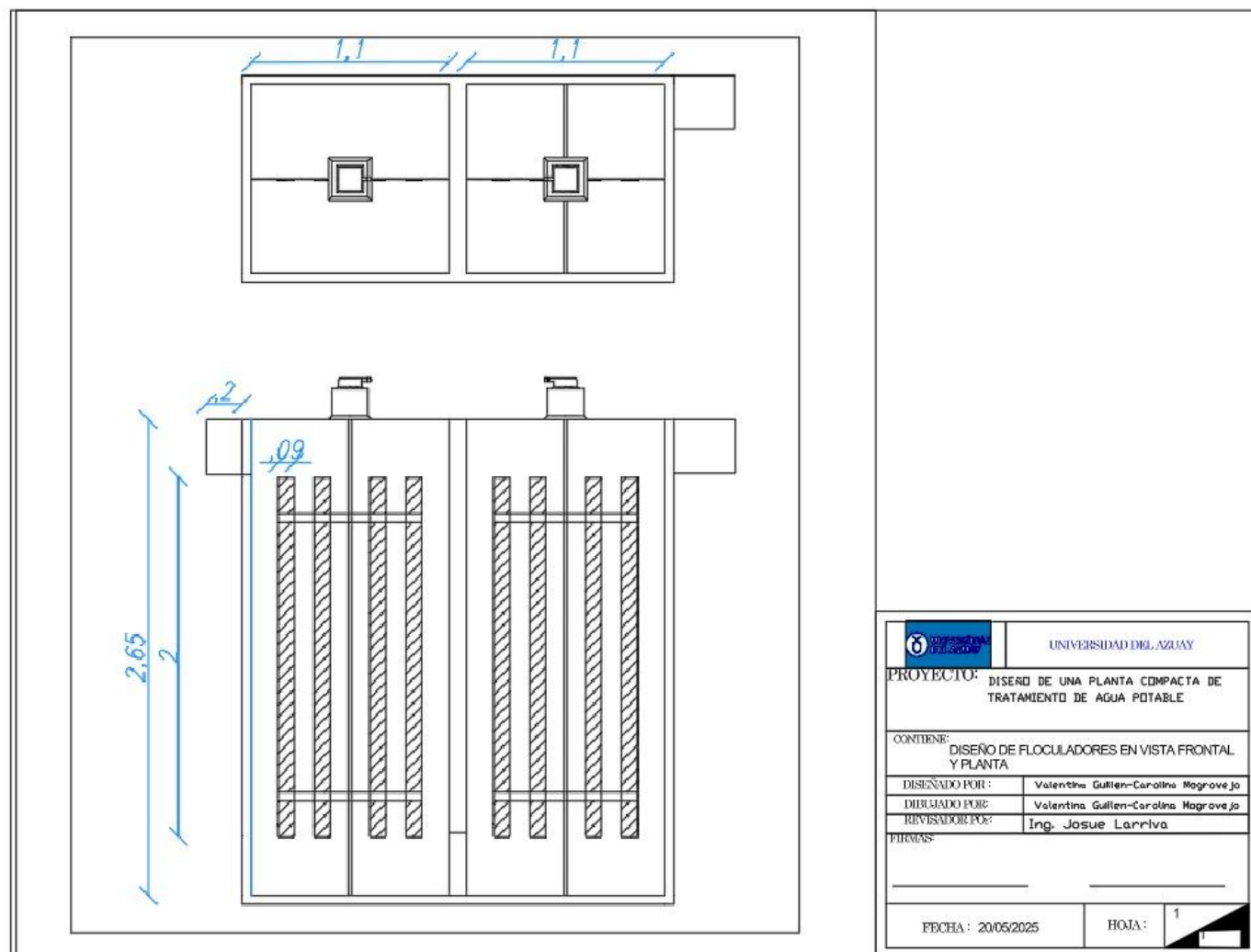
Fuente: Elaboración propia

FILTRACION PLANTA SAN PEDRO		
Caudal	15	l/s
	0,015	m ³ /d
Viscocidad dinamica del agua	1,271	cp
	11	°C
Numero de filtros	4	
Carga superficial Cs	180	m/d
Cs max	240	m/dia
Area de filtracion	1,90	
Porosidad de la arena	0,45	
Ancho de la canaleta	0,3	
Tiempo de lavado del filtro	10	min
Carrera del filtro	24	h
Borde libre de la canaleta	0,12	m
Qdiseño	0,0075	
	0,648	m ³ /dia
tamaño particulas	0,7	mm
V. arrastre arena	7	
Velocidad de fluidizacion	0,193	
Velocidad de lavado (20 °C)	0,7	m/min
velocidad corregida 11C	0,65	m/min
Diseño de las canaletas de lavado		

Caudal de lavado	0,020	m ³ /s
Lamina de agua de la canaleta	0,05	m
Altura total de la canaleta	0,005	
Volumen de agua para lavar el filtro	12,26	m ³
Volumen filtrado en un día	0,015	
% Agua de lavado	1,00	%

Fuente: Elaboración propia

Anexo 4 Diseño de los floculadores



Fuente: Elaboración propia

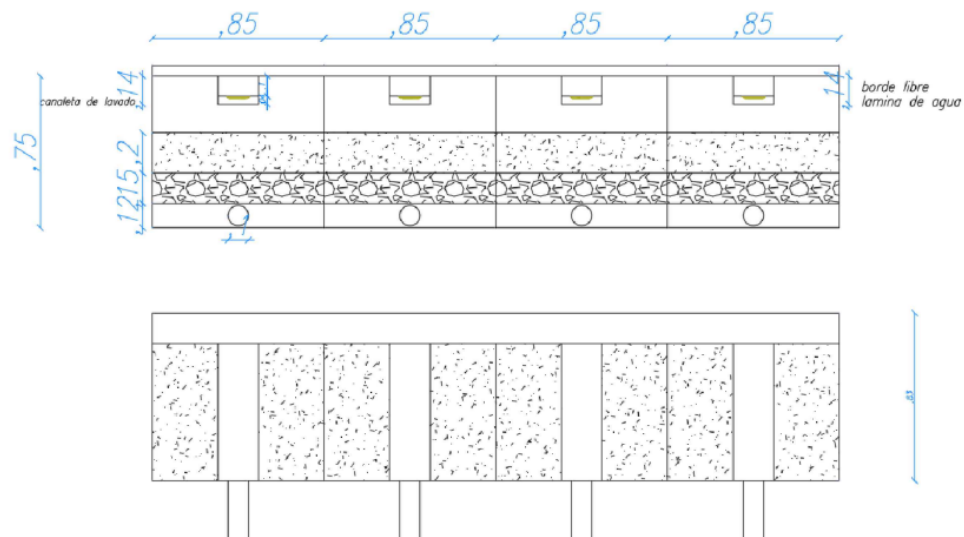
Anexo 5 Diseño de los sedimentadores



 UNIVERSIDAD DEL AZUAY	
PROYECTO: DISEÑO DE UNA PLANTA COMPACTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE	
CONTIENE: DISEÑO DE SEDIMENTADORES EN VISTA FRONTAL Y PLANTA	
DISEÑADO POR:	Valentina Guillen-Carolina Magrovejo
DIBUJADO POR:	Valentina Guillen-Carolina Magrovejo
REVISADOR POR:	Ing. Josue Larriva
FIRMAS:	
FECHA: 20/05/2025	
HOJA: 1	

Fuente: Elaboración propia

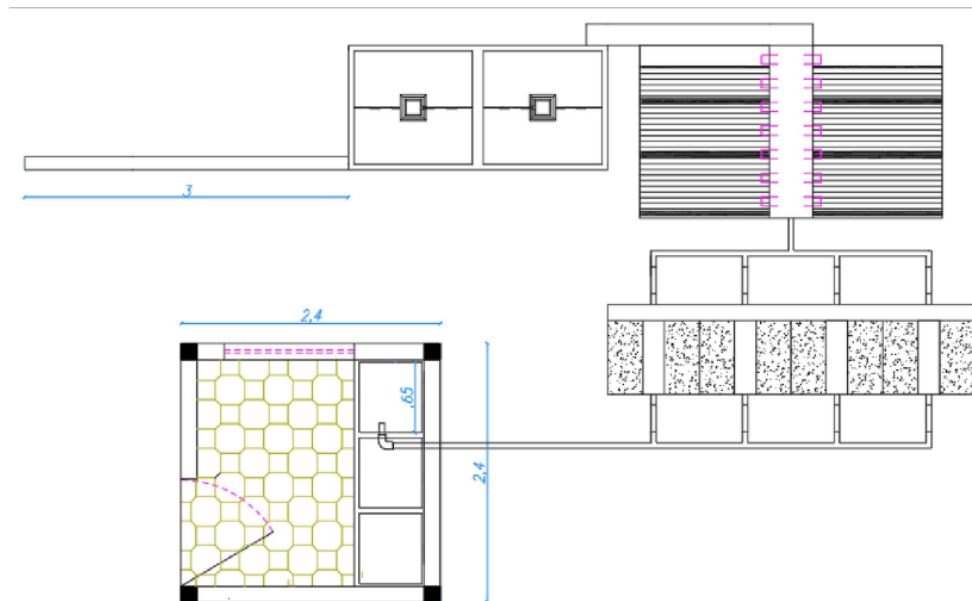
Anexo 6 Diseño de filtración



 UNIVERSIDAD DEL AZUAY	
PROYECTO: DISEÑO DE UNA PLANTA COMPACTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE	
CONTIENE: DISEÑO DE SEDIMENTADORES EN VISTA FRONTAL Y PLANTA	
DISEÑADO POR:	Valentina Guillen-Carolina Mogrovejo
DIBUJADO POR:	Valentina Guillen-Carolina Mogrovejo
REVISADOR POR:	Ing. Josue Larriba
FIRMAS: _____	
FECHA: 20/05/2025	HOJA: 1

Fuente: Elaboración propia

Anexo 7 Diseño final de la planta compacta



		UNIVERSIDAD DEL AZUAY	
PROYECTO: DISEÑO DE UNA PLANTA COMPACTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE			
CONTIENE: DISEÑO COMPLETO DE LA PLANTA			
DISEÑADO POR:		Valentina Guillen-Carolina Mogrovejo	
DIBUJADO POR:		Valentina Guillen-Carolina Mogrovejo	
REVISADOR POR:		Ing. Josue Larriva	
FIRMAS: 			
FECHA: 20/05/2025		HOJA:	1

Fuente: Elaboración propia

Bibliografía

- Arellano, M. A. (2022). *Diseño hidraulico de plantas de tratamiento de agua potable*.
- AWWA, A. W. (2011). *Water treatment plant design*.
- Bastidas. (2010). *Procesos Unitarios en Ingeniería Sanitaria*.
- Chulluncuy Camacho, N. C. (2011). *Tratamiento de agua para consumo humano*. lima.
Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/3374/337428495008.pdf>
- FAO, O. d. (2006). *Manual de captacion y aprovechamiento de agua de lluvia*.
- Grupo Acura. (1988). Obtenido de <https://grupoacura.com/es/blog/coagulacion-floculacion/>
- hidritec. (2011). *Plantas compactas de tratamiento de agua potable*. Obtenido de Plantas compactas de tratamiento de agua potable:
<http://www.hidritec.com/hidritec/plantas-compactas-de-tratamiento-de-agua-potable>
- INEN. (2014). *Norma Tecnica Ecuatoriana NTE INEN 1108:2014. Agua potable - requisitos*. Quito.
- Restrepo, M. (2007). *Tratamiento de Agua para consumo humano*.
- Tchobanoglous, G., & Schroeder, E. D. (2002). *Water Quality: Management and Treatment*.
- Velázquez, M. (2015). *Tecnología del Agua Potable*.