

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingeniería**

**Diseño de una planta dual de producción de lavavajillas**

**con microorganismos eficientes y de potabilización de**

**agua**

**Antonia Amelie Lopez Peña**

**Ingeniería Química**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito para la obtención del

título de INGENIERA QUÍMICA

Quito, 10 de Diciembre de 2024

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**USFQ**

**Colegio de Ciencia e Ingeniería**

**HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO FIN DE CARRERA**

**Diseño de una planta dual de producción de lavavajillas**

**con microorganismos eficientes y de potabilización de**

**agua**

**Antonia Amelie Lopez Peña**

**Nombre del profesor, Título académico**

**David Egas, PhD.**

Quito, 10 de Diciembre de 2024

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Antonia Amelie Lopez Peña

Código: 00322066

Cédula de identidad: 1720622008

Lugar y fecha: Quito, 10 de Diciembre de 2024

## **ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

## **UNPUBLISHED DOCUMENT**

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

## RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño de una planta dual que integra la producción de lavavajillas biodegradable con microorganismos eficientes (EM) y un sistema de tratamiento de agua potable. Los EM, encapsulados, mejoran la biodegradación de la materia orgánica y eliminan los coliformes presentes en el agua. La formulación del lavavajillas biodegradable fue desarrollada utilizando tensioactivos biodegradables y agentes estabilizantes compatibles con los EM incluidos al 1% dentro de la formulación, asegurando una limpieza efectiva del producto sin comprometer la eficiencia del pre-tratamiento.

El proceso de tratamiento y potabilización de agua integra tecnologías biológicas y fisicoquímicas, incluyendo aireación con *Pseudomonas aeruginosa*, floculación, sedimentación, filtración y desinfección, para obtener los estándares de calidad para agua potable. Este trabajo a través de la metodología HAZOP identificó riesgos clave y se implementaron medidas, como sistemas de control automatizados, para garantizar una operación segura y eficiente de la planta en los equipos más importantes.

El dimensionamiento de la planta consideró el caudal de producción y los volúmenes necesarios para cada equipo, con un consumo energético anual de 25,894.4 kW. El análisis económico mostró que la rentabilidad depende en gran medida de la venta del lavavajillas biodegradable, ya que el precio del agua es insuficiente para cubrir los costos operativos. El valor actual neto (VAN) es de 990,067.78, con una tasa interna de retorno (TIR) de 40.3% y un tiempo de recuperación de 4.56 años. Este proyecto se alinea con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), proporcionando un modelo replicable para la gestión del agua y la fabricación de productos ecológicos en comunidades con recursos limitados.

**Palabras claves:** Lavavajillas biodegradable, microorganismos eficientes (EM), tratamiento de agua, sostenibilidad, dimensionamiento de planta, consumo energético, análisis económico

## ABSTRACT

This work presents the design of a dual plant that integrates the production of biodegradable dishwashing liquid with efficient microorganisms (EM) and a potable water treatment system. The EM, encapsulated, enhance the biodegradation of organic matter and eliminate coliforms present in the water. The formulation of the biodegradable dishwashing liquid was developed using biodegradable surfactants and stabilizing agents compatible with the EM, included at 1% in the formulation, ensuring effective cleaning without compromising the efficiency of the pre-treatment.

The water treatment and potable water production process integrates biological and physicochemical technologies, including aeration with *Pseudomonas aeruginosa*, flocculation, sedimentation, filtration, and disinfection, to meet potable water quality standards. Through the HAZOP methodology, this work identified key risks, and measures, such as automated control systems, were implemented to ensure the safe and efficient operation of the plant's key equipment.

The plant sizing considered the production flow rate and the volumes required for each piece of equipment, with an annual energy consumption of 25,894.4 kW. The economic analysis showed that profitability heavily depends on the sale of biodegradable dishwashing liquid, as the price of water is insufficient to cover operational costs. The net present value (NPV) is 990,067.78 \$, with an internal rate of return (IRR) of 40.3% and a payback period of 4.56 years. This project aligns with several Sustainable Development Goals (SDGs), providing a replicable model for water management and the production of eco-friendly products in resource-limited communities.

**Keywords.** Biodegradable dishwashing liquid, efficient microorganisms (EM), water treatment, sustainability, plant sizing, energy consumption, economic analysis.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1.1 Antecedentes .....</b>	<b>10</b>
<b>1.2 Justificación para la implementación del proyecto.....</b>	<b>12</b>
<b>1.3 Impactos .....</b>	<b>13</b>
<b>1.4 Objetivos del proyecto .....</b>	<b>13</b>
<b>1.4.1 Objetivo general.....</b>	<b>13</b>
<b>1.5 Resultados esperados .....</b>	<b>14</b>
<b>2. BASES DEL DISEÑO .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Descripción de los productos.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Descripción de la materia prima.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3 Ubicación de la planta.....</b>	<b>18</b>
<b>2.4 Limitaciones.....</b>	<b>18</b>
<b>2.5 Terminología Especializada .....</b>	<b>19</b>
<b>3. DISEÑO DEL PROCESO.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Caudal de producción .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2 Selección y descripción del proceso a ser implementado.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2.1 Producción y formulación del lavavajillas biodegradable con EM.....</b>	<b>21</b>
<i>3.2.1.1 Diagrama de bloques. ....</i>	<b>22</b>
<i>3.2.1.2 Diagrama de flujo. ....</i>	<b>23</b>
<b>3.2.2 Producción de agua potable. ....</b>	<b>24</b>
<i>3.2.2.1 Diagrama de bloques. ....</i>	<b>24</b>
<i>3.2.2.2 Diagrama de flujo. ....</i>	<b>25</b>
<b>3.3 Balance de masa .....</b>	<b>26</b>
<b>3.3.1 Balance de masa EM.....</b>	<b>26</b>
<b>3.3.2 Balance de masa lavavajillas.....</b>	<b>26</b>

3.3.3 Balance de masa del proceso de potabilización de agua.....	27
<b>4. DISEÑO DE LA PLANTA DUAL .....</b>	<b>28</b>
<b>4.1 Selección de equipos.....</b>	<b>28</b>
4.1.1 Tanques de almacenamiento.....	28
4.1.2 Biorreactores.....	28
4.1.3 Tanques de agitación.....	29
4.1.4 Banda transportadora.....	29
4.1.5 Tamizador.....	29
4.1.7 Sedimentador.....	29
4.1.8 Filtros de arena.....	30
4.1.9 Bombas.....	30
4.1.10 Laboratorio de control de calidad.....	30
<b>4.2 Dimensionamiento.....</b>	<b>31</b>
<b>4.3 Consumo energético.....</b>	<b>31</b>
<b>4.4 Layout de la planta.....</b>	<b>31</b>
<b>5. ANÁLISIS DE SEGURIDAD .....</b>	<b>33</b>
<b>6. ANÁLISIS ECONÓMICO.....</b>	<b>35</b>
6.1 Estimación de costos de la planta de producción .....	35
6.2 Inversión de capital Fijo .....	36
6.3 Inversión de capital del trabajo .....	36
6.4 Estimación de ingresos.....	37
6.5 Análisis de rentabilidad .....	38
<b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>39</b>
7.1 Conclusiones .....	39
7.2 Recomendaciones .....	39
<b>8. REFERENCIAS.....</b>	<b>41</b>
<b>ANEXO A. DISEÑO DEL PROCESO .....</b>	<b>45</b>

<b>ANEXO B. BALANCE DE MASA TRATAMIENTO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA.....</b>	<b>49</b>
<b>ANEXO C. DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA.....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO D. CONSUMO ENERGÉTICO DE LOS EQUIPOS.....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXO E. LAYOUT DE LA PLANTA.....</b>	<b>65</b>
<b>1. Parqueaderos.....</b>	<b>65</b>
<b>2. Oficinas Administrativas.....</b>	<b>65</b>
<b>3. Laboratorio de Control de Calidad.....</b>	<b>65</b>
<b>4. Zona de Almacenamiento del Lavavajillas.....</b>	<b>66</b>
<b>ANEXO F. ANÁLISIS DE SEGURIDAD.....</b>	<b>69</b>
<b>5.1 Producción de lavavajillas.....</b>	<b>69</b>
<b>5.2 Potabilización de agua.....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXO G. ANÁLISIS ECONÓMICO.....</b>	<b>84</b>
<b>1. Capital de inversión.....</b>	<b>84</b>
<b>2. Capital de trabajo.....</b>	<b>89</b>
<b>3. Estimación de ingresos.....</b>	<b>93</b>
<b>4. Análisis de rentabilidad.....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO H. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....</b>	<b>99</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

El agua es uno de los recursos más importantes para el desarrollo de todas las formas de vida (Baquerizo 2019). La mayor parte del agua dulce en la Tierra se encuentra en superficies como lagos, estanques, embalses, ríos, arroyos y humedales, representando tan solo el 0.3% del total del agua dulce disponible (Aqua Foundation 2022). Entre estas fuentes, los ríos son especialmente importantes para la sociedad y la economía, ya que proporcionan agua para consumo humano, uso doméstico, riego agrícola, actividades ganaderas e industriales. Sin embargo, la contaminación, las sequías y el crecimiento poblacional han desencadenado una crisis global del agua dulce, amenazando las fuentes que abastecen nuestras necesidades más esenciales, como el agua potable. La calidad del agua de los ríos está deteriorándose por los múltiples usos que el ser humano da a este recurso y por el mal manejo de residuos y contaminantes que se desechan directamente en los ríos (Mat Saad et al. 2022).

Actualmente, existen múltiples formas de tratar de restaurar y de limpiar fuentes de agua tales como el tratamiento de aguas residuales mediante técnicas fisicoquímicas, al igual que biorremediaciones con microorganismos. La biorremediación es sumamente eficiente y se ha demostrado que es menos costosa que tratamientos tradicionales (Ayilara y Babalola 2023). Además, se ha determinado que la biorremediación es más eficiente cuando los microorganismos son micro encapsulados mediante gelación iónica para una liberación controlada (Valdivia-Rivera et al. 2021). Los Microorganismos Eficientes o EM son una tecnología innovadora a base de levaduras, bacterias ácido-lácticas entre otras, para tratar aguas residuales y disminuir residuos orgánicos y coliformes (Romero López y Vargas Mato 2017), que está siendo cada vez más utilizada por su eficiencia y potencial.

Barichara es el pueblo más turístico de Colombia. Barichara, ubicado en el Departamento de Santander, tiene 11,100 habitantes y en épocas turísticas el pueblo puede

llegar a tener 22,200 habitantes (Cabildo de Barichara 2024). En Barichara se calcula que un habitante promedio puede consumir entre 50 y 200 litros de agua al día, mientras que un turista hasta 400 litros de agua al día (Redacción Semana 2024). Sin embargo, Barichara no posee un sistema propio de potabilización de agua y solo recibe 2 litros por segundo de agua potable de una planta de agua portátil de la Cruz Roja (Ríos 2024), por lo que el pueblo se encuentra en una crisis severa de agua. Ya que este caudal no abastece a toda la población, el pueblo ha comenzado a usar el agua del río Suárez que pasa por la quebrada de Barichara. El río Suárez, es uno de los ríos más importantes del Departamento de Santander, sin embargo, la calidad del río se ha deteriorado drásticamente. Estudios previos determinaron varios contaminantes del río Suárez, principalmente coliformes y hierro, un metal pesado que afecta su potabilidad y aporta un sabor y color desagradable al agua (Corrales Ramírez et al. 2021).

Los riesgos de consumo y uso de aguas residuales contaminadas pueden ser graves para la salud humana y el medio ambiente. Los coliformes, al igual que el hierro pueden causar enfermedades gastrointestinales e incluso en casos más graves la muerte (Jafari A, Mm, and Bouzari 2012). Adicionalmente el impacto ambiental es severo ya que existe un desequilibrio ecológico al alterar los ecosistemas acuáticos.

Uno de los mayores contaminantes del agua son los surfactantes (agentes limpiadores que provocan espuma) usados altamente en la sociedad moderna y que provienen de todos los productos de limpieza usados a nivel doméstico e industrial (Choque-Quispe et al.). 2021). Este tipo de contaminación puede ser evitada mediante la adopción de nuevos productos ecológicos y biodegradables. Sin embargo, los lavavajillas biodegradables, aunque no sean contaminantes, no ayudan a eliminar otros tipos de contaminantes de las aguas residuales tales como coliformes y residuos orgánicos.

## 1.2 Justificación para la implementación del proyecto

Mediante la ejecución de este proyecto de diseño de una planta dual de producción de lavavajillas biodegradable con microorganismos eficientes (EM) y de una planta de potabilización de agua se conseguirá satisfacer la demanda de agua potable de Barichara, Santander. Al desarrollar un sistema de tratamiento de aguas residuales y de potabilización que sea sostenible y eficiente, este proyecto contribuirá a la solución de problemas ambientales actuales como la escasez de agua y la contaminación hídrica. Además, al promover la reutilización del agua tratada, se fomenta la conservación de los recursos hídricos en una región donde la disponibilidad de agua es crítica.

La originalidad de este trabajo radica en la integración al sistema de tratamiento de aguas, una planta de producción de lavavajillas biodegradable con tecnología de microorganismos eficientes (EM) que permitirán limpiar las aguas residuales domésticas. Aunque existen estudios previos sobre el uso de EM en biorremediación, la combinación específica de estos elementos en un contexto doméstico y su aplicación en una comunidad como Barichara representa un enfoque innovador. Este proyecto no solo busca mejorar la calidad del agua consumida por la comunidad de Barichara, sino también reducir el impacto ambiental de los productos de limpieza convencionales.

Otra motivación importante es la producción ya existente de lavavajillas dentro del pueblo de Barichara, y la necesidad de escalar esta producción a un nivel más industrial para poder abastecer la demanda de lavavajillas en el Departamento de Santander. Con este estudio es posible realizar un posible escalamiento de la planta.

Este proyecto está directamente alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6 (Agua limpia y saneamiento) y 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), según la ONU. Al

implementar un sistema eficiente de tratamiento de aguas residuales y promover el uso de detergentes biodegradables, garantizamos la disponibilidad de agua y su gestión sostenible, además de transformar a Barichara en un pueblo más sostenible. De igual manera, al disminuir la contaminación del agua y fomentar hábitos de consumo responsables, el proyecto también apoya los ODS 12 (Producción y consumo responsables) y 13 (Acción por el clima), implementando una idea para un futuro sostenible para las generaciones presentes y futuras (ONU, 2022).

### **1.3 Impactos**

El impacto ambiental del proyecto incluye reducir contaminantes con la tecnología de microorganismos eficientes (EM), que permite eliminar impurezas y residuos tóxicos de aguas residuales y mejora la calidad del agua, y disminuir el uso de químicos sintéticos, agresivos y contaminantes mediante lavavajillas biodegradables. Además, al tratar las aguas residuales para potabilizarlas se contribuye a conservar los recursos hídricos. En términos económicos, se destacan el ahorro en costos operativos en el tratamiento de aguas residuales al usar EM, la creación de nuevos mercados para la venta de lavavajillas biodegradables y la generación de empleo local. Desde una perspectiva social, el proyecto mejora la salud y la calidad de vida al reducir la contaminación y los riesgos de enfermedades transmitidas por el agua y fomenta la participación comunitaria, fortaleciendo el sentido de responsabilidad compartida hacia el medio ambiente.

### **1.4 Objetivos del proyecto**

#### **1.4.1 Objetivo general.**

Implementar una solución integral y sostenible para reducir la contaminación del agua en la comunidad de Barichara, Santander mediante el diseño de una planta de producción de lavavajillas biodegradable con microorganismos eficientes (EM) y una planta de tratamiento y potabilización de aguas residuales.

### **1.4.2 Objetivos específicos.**

Se plantean los siguientes objetivos específicos, los cuales se desarrollarán en los capítulos 3, 4, 5 y 6 respectivamente, para poder alcanzar el objetivo general.

1. Proponer la formulación de un lavavajillas biodegradable que incorpore microorganismos eficientes (EM), capaces de eliminar coliformes presentes en las aguas residuales domésticas.

2. Diseñar y dimensionar una planta dual que integre la producción de un lavavajillas biodegradable con microorganismos eficientes (EM) que abastezca la demanda de lavavajillas del departamento de Santander y un sistema de potabilización de agua que abastezca la demanda de agua de la comunidad de Barichara.

3. Realizar un análisis de seguridad basado en la metodología HAZOP para la planta dual de producción de lavavajillas biodegradable y tratamiento de agua.

4. Realizar un análisis económico para determinar la rentabilidad del proyecto

### **1.5 Resultados esperados**

Los resultados esperados de este trabajo son lograr una formulación eficiente de un lavavajillas biodegradable que incorpore microorganismos eficientes (EM), que podrán eliminar coliformes y otros contaminantes en las aguas residuales, contribuyendo directamente a mejorar la calidad del agua utilizada en Barichara. Adicionalmente, se espera obtener el diseño y dimensionamiento óptimos de una planta dual que integre tanto la producción del lavavajillas biodegradable como un sistema de tratamiento y potabilización de agua a partir de las aguas residuales del pueblo que satisfaga las necesidades de la comunidad de Barichara. Además, se espera que el proyecto sea económicamente rentable asegurando que la planta pueda ser mantenida y operada a largo plazo de manera sostenible.

## **2. BASES DEL DISEÑO**

### **2.1 Descripción de los productos**

El proyecto desarrollará dos productos. El primero es un lavavajillas biodegradable formulado con ingredientes naturales y microorganismos eficientes (EM), formulado para una limpieza efectiva, y para contribuir a la reducción de contaminantes en el agua residual. Este lavavajillas actúa descomponiendo residuos orgánicos y, a través de los EM, ayudando a la eliminación de coliformes y otros residuos del agua. El segundo producto es el agua potable tratada, que resultará del proceso de limpieza en la planta de potabilización. El agua residual que contiene los EM y que ha sido usada en los hogares de la comunidad pasará por un sistema de tratamiento en una segunda planta, donde se eliminarán los contaminantes restantes mediante varios procesos fisicoquímicos. El agua potable será segura y de alta calidad cumpliendo los estándares sanitarios y legislaciones para el consumo humano que se presentan a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Tabla de los valores máximos permisibles de contaminantes en aguas potables en Colombia (ICONTEC y Ministerio de Salud Pública de Colombia 2008).

Parámetro	Valor Máximo Permissible
Hierro Total ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0.3 mg/L
Coliformes Totales	No más del 10% de muestras con presencia en un mes
Escherichia coli	0 en 100 cm <sup>3</sup> de agua
Turbiedad	2 UNT
pH	6.5 - 9.0
Cloro Residual Libre	1.0 mg/L
Cloruros ( $\text{Cl}^-$ )	250 mg/L
Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	250 mg/L
Plomo ( $\text{Pb}^{2+}$ )	0.01 mg/L
Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ )	45 mg/L
Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ )	0.01 mg/L

## 2.2 Descripción de la materia prima

El lavavajillas biodegradable será formulado a partir de una combinación de tensioactivos suaves y altamente biodegradables, como la betaína de coco, el Alkil Poliglucósido (APG) y el Alfa Olefín Sulfonato de Sodio (AOS). La betaína de coco es un tensioactivo derivado del aceite de coco fácilmente biodegradable, conocido por generar espuma estable y aportar suavidad en productos de limpieza, ideal para el contacto de

tensioactivos directamente con la piel (POCHTECA Chile 2020). El Alkil Poliglucósido (APG) es un tensioactivo no iónico derivado de azúcares de origen vegetal, especialmente conocido por su suavidad en la piel y su rápida biodegradabilidad (Carrión 2006) , mientras que el Alfa Olefin Sulfonato de Sodio es un tensioactivo aniónico que contribuye a la capacidad de limpieza y eliminación de grasa del lavavajillas. Se destaca por su eficiencia a bajas concentraciones, su alta biodegradabilidad y su bajo impacto ambiental (Ximena et al., s/f).

Los conservantes utilizados para esta formulación serán el benzoato de sodio y el sorbato de potasio. Usados para inhibir el crecimiento de microorganismos no deseados, asegurando la estabilidad y seguridad del producto durante su vida útil comunes en productos de limpieza, son compatibles con los Microorganismos Eficientes (EM). Adicionalmente como agente quelante se utilizará EDTA (ácido etilendiaminotetraacético) que contribuye a eliminar minerales duros del agua y mejorando la eficacia de los tensioactivos. Los EM consisten en una mezcla de bacterias fotosintéticas, bacterias ácido-lácticas y levaduras que permiten degradar la materia orgánica (CANALES LÓPEZ y SEVILLA CARPIO 2016). En cuanto al proceso de encapsulación se utilizará alginato de sodio de grado de laboratorio en un baño gelificante de carbonato de calcio que permitirá encapsular los EM para una liberación controlada.

En la planta de tratamiento y potabilización de agua, se utilizan varias materias primas clave, principalmente filtros de arena, hidroxiclورو de aluminio para la floculación e hipoclorito de sodio para la desinfección. Los filtros de arena eliminan partículas suspendidas y sedimentos del agua. El hidroxiclورو de aluminio se utiliza como coagulante para mejorar el proceso de floculación. Al añadirse al agua, neutraliza las cargas eléctricas de las partículas suspendidas, promoviendo su agrupación en flóculos más grandes (Alarcón 2023), que luego

se eliminan fácilmente mediante sedimentación. El hipoclorito de sodio actúa como desinfectante, eliminando patógenos como bacterias y virus.

### **2.3 Ubicación de la planta**

Se propone ubicar la planta dual directamente en el pueblo de Barichara para abaratar costos de distribución del agua potable. Esta planta será ubicada en la antigua planta de tratamiento de agua de Barichara que actualmente está abandonada cerca del mirador “Salto del Mico”, en donde existe una inclinación del terreno que permitirá abaratar costos al momento de la aeración del agua potable al igual que el bombeo de las aguas residuales que provienen del pueblo ubicadas por encima del terreno previamente mencionado.

### **2.4 Limitaciones**

Los recursos financieros representan un desafío significativo en la implementación y mantenimiento del proyecto. Los costos elevados asociados con la adquisición de equipos y la contratación de personal calificado pueden limitar el alcance y la efectividad del proyecto. Sin los fondos adecuados o un subsidio por parte del gobierno, es posible que se deban hacer concesiones que afecten la calidad del proyecto o incluso su viabilidad. El financiamiento podría provenir de organizaciones no gubernamentales y sin fines de lucro como la Fundación Natura Colombia, la Fundación Aquae, especializada en recuperación de agua y que opera en Colombia, o la Fundación TerritoriA, que ya trabaja en varios aspectos sociales en Barichara y tiene un vínculo con la comunidad. Asimismo, la ONU, a través de su programa ONU-Agua, podría ofrecer apoyo financiero o de recursos para asegurar el éxito del proyecto. En términos de capacidades técnicas, la falta de personal capacitado para realizar pruebas y análisis complejos puede reducir la precisión de los resultados. De igual manera, una infraestructura inadecuada para tomar muestras, almacenar y analizar agua puede dificultar el procesamiento de muestras en los plazos establecidos, lo cual pondría en riesgo la calidad del agua. La

producción de un lavavajillas biodegradable con EM y otros componentes requiere materias primas de alta calidad. La variabilidad en la calidad de los insumos podría afectar la eficiencia del proceso y la calidad del producto final.

En cuanto a limitaciones externas las regulaciones nacionales e internacionales de tratamientos biológicos y de potabilización de agua pueden exigir permisos regulatorios, equipos de alta precisión, entre otras adaptaciones que pueden afectar el proyecto. Es importante alinearse con las leyes y regulaciones ambientales más importantes de Colombia, como la resolución 1207 de 2014 que establece los criterios para diseñar, construir y operar sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas, el decreto 1076 de 2015 que compila las normas del sector ambiente y desarrollo sostenible, incluyendo disposiciones sobre la gestión del recurso hídrico y el control de la contaminación y la Norma Técnica Colombiana NTC 1500 mencionada antes que proporciona directrices sobre la calidad del agua potable y los requisitos que deben cumplir los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Además, factores ambientales como las alteraciones climáticas, como sequías o inundaciones, pueden afectar la disponibilidad y la calidad del agua, alterando la operación y eficacia de la planta. Al igual que fuentes de contaminación externa no controladas que pueden llegar a ser parte del efluente doméstico que llegue a la planta de potabilización de agua.

## **2.5 Terminología Especializada**

1. Microorganismos Eficientes (EM): Una mezcla de microorganismos benéficos, incluyendo levaduras, bacterias lácticas y bacterias fotosintéticas, que se utilizan en procesos biotecnológicos para mejorar la calidad del agua y del suelo al descomponer materia orgánica y eliminar contaminantes.
2. Lavavajillas Biodegradable: Un detergente formulado con ingredientes naturales y microorganismos eficientes, diseñado para ser completamente degradado por

procesos naturales sin causar daño al medio ambiente. Contiene tensioactivos biodegradables, agentes quelantes y conservantes compatibles con los EM.

3. Tensioactivos: Compuestos químicos que reducen la tensión superficial entre dos líquidos o entre un líquido y un sólido. En este proyecto, se utilizan tensioactivos biodegradables como la betaína de coco, Alkil Poliglucósido (APG) y Alfa Olefín Sulfonato de Sodio (AOS).
4. Floculación: Proceso de coagulación en el tratamiento de agua donde se agregan floculantes (como el hidroxiclورو de aluminio) para aglomerar partículas suspendidas en el agua en flóculos más grandes, facilitando su sedimentación y posterior eliminación.
5. Sedimentación: Operación unitaria en la que las partículas más densas que el agua se asientan en el fondo de un tanque por acción de la gravedad, permitiendo la separación de sólidos y líquidos en el proceso de tratamiento de agua.
6. Cloración: Método de desinfección en el cual se añade hipoclorito de sodio al agua para eliminar patógenos, incluyendo bacterias, virus y protozoos. Es un paso clave en la potabilización del agua para asegurar su seguridad microbiológica.
7. Reactor Biológico: Equipo utilizado en el tratamiento de aguas residuales donde los microorganismos degradan materia orgánica en condiciones controladas. Puede incluir aireación y mezcla para optimizar el proceso biológico.

### **3. DISEÑO DEL PROCESO**

#### **3.1 Caudal de producción**

En primer lugar, el caudal de producción para la planta de producción del lavavajillas fue establecido para abastecer el mercado potencial de jabón lavavajillas del Departamento de Santander. Santander cuenta con una población de 2,180,000 de habitantes. Actualmente se conoce que el colombiano promedio consume 0.5kg de lavavajillas anualmente (Olenka et al. 2012). Es decir que el caudal de producción anual de la planta será de 1,090,000 kg/año de lavavajillas. Teniendo en cuenta que la planta estará en operación 340 días al año trabajando durante 8 horas, el caudal de la planta por hora será de 400.74 kg/hora. En segundo lugar, la planta de potabilización de agua recibirá la demanda base de aguas residuales del pueblo de Barichara. Es decir, del consumo promedio (125 litros diarios) de los 11,100 habitantes fijos de Barichara. El caudal anual de la planta de potabilización de agua sería de 506,437,500 litros al año. Como la planta operaría 365 días al año durante 24 horas, el caudal por hora sería de 57,812.5 litros/hora sin considerar los sólidos suspendidos.

#### **3.2 Selección y descripción del proceso a ser implementado**

##### **3.2.1 Producción y formulación del lavavajillas biodegradable con EM.**

Los microorganismos eficientes (5%) deben ser activados con melaza de caña (5%) y agua (90%) durante 7 días para permitir su crecimiento (Canales López y Sevilla Carpio 2016). A continuación, se mezclan con una solución de alginato de sodio (6% p/v) y luego esta mezcla es goteada en el baño gelificante de cloruro de calcio (1%p/v) para lograr una microencapsulación eficiente en una relación 1:10 (Durán 2023). De acuerdo con lavavajillas biodegradables anteriormente diseñados por Ximena et al., s/f y con ajustes para implementar los microorganismos eficientes y los tres surfactantes, la formulación adecuada para el lavavajillas se puede observar en el Anexo A en donde se detalla cada compuesto y su uso.

### 3.2.1.1 Diagrama de bloques.

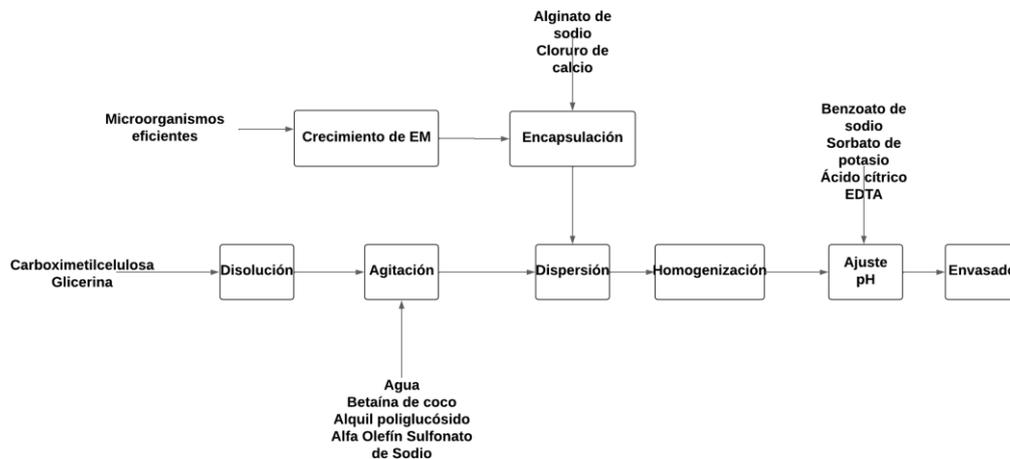


Figura 1. Diagrama de bloques de la producción de lavavajillas biodegradable con Microorganismos eficientes

La producción del lavavajillas generalmente se hace a partir de la disolución del gelificante en la glicerina para facilitar la disolución. Luego se añaden los otros ingredientes líquidos: agua, betaína de coco, alquil poliglucósido, alfa olefín sulfonato de sodio y fragancia y se agita hasta obtener una mezcla homogénea. En el caso del lavavajillas con microorganismos eficientes, se procede a añadir los EM encapsulados y luego se corrige pH. El pH de la mezcla debido a los surfactantes será alcalino (pH entre 7.5-8), por lo que se usará ácido cítrico para poder reducir el pH a 6, pH ideal para que los EM puedan sobrevivir. Finalmente, el lavavajillas se empaqueta en envases plásticos opacos que aseguren la estabilidad de los EM de 500g.

### 3.2.1.2 Diagrama de flujo.

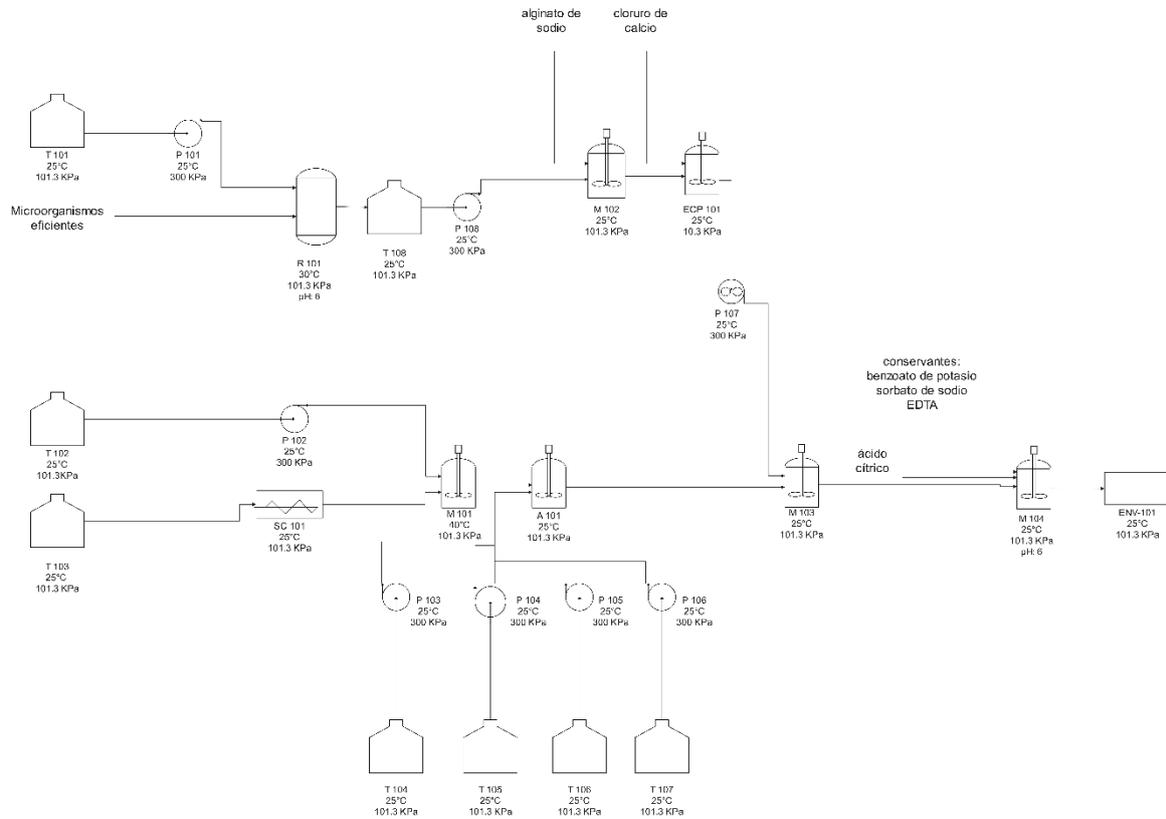


Figura 2. Diagrama de flujo de la producción de lavavajillas biodegradable con EM. La descripción de cada equipo se encuentra indexada en el anexo A.

### 3.2.2 Producción de agua potable.

#### 3.2.2.1 Diagrama de bloques.

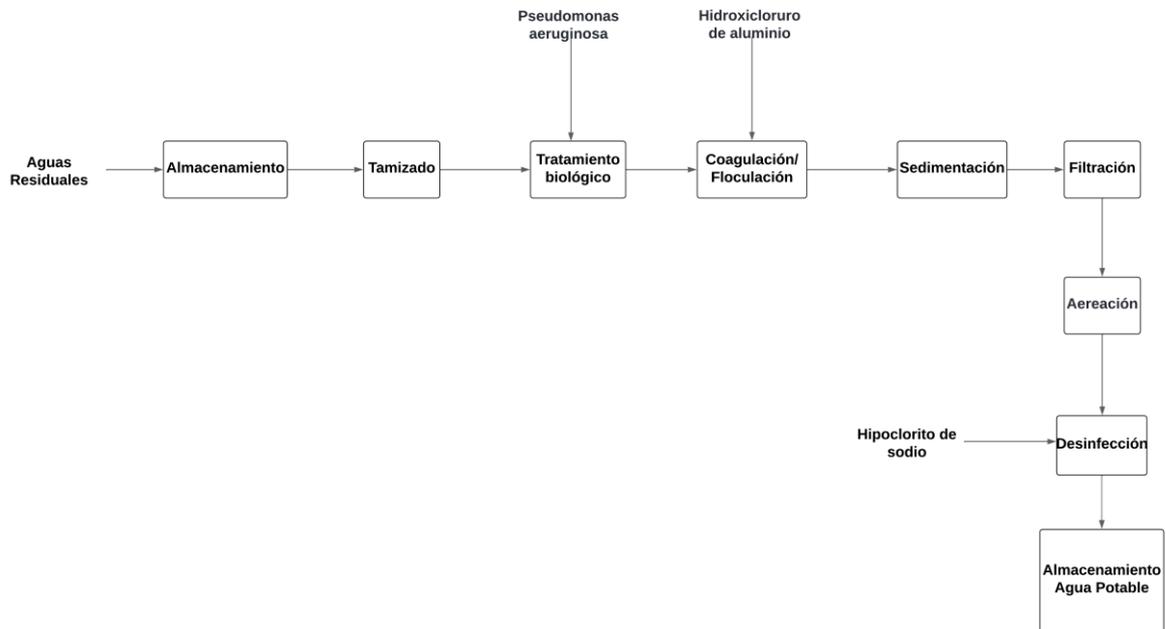


Figura 3. Diagrama de bloques de la producción de agua potable a partir de aguas residuales domésticas

El proceso de potabilización de aguas de este proceso es un proceso clásico de tratamiento de aguas residuales combinado con un proceso de potabilización de aguas. Las aguas residuales recolectadas de la comunidad de Barichara primero pasan por un proceso de tamizado para eliminar los sólidos grandes y otros materiales suspendidos. Después de este pretratamiento físico, el agua entra en un reactor biológico aeróbico, donde se utilizan los eficientes ya presentes en el agua y otra bacteria filamentosa que se adiciona al reactor (*Pseudomona aeruginosa* en una concentración de  $10^7$  UFC/mL, 1% p/v) para descomponer la materia orgánica y reducir la carga de contaminantes. El proceso de biorremediación ocurre con oxígeno, lo que permite a los microorganismos metabolizar y eliminar los compuestos presentes en el agua, y en menor tiempo por el tiempo de residencia elevado de los EM, ya que

actúan desde que los desechan las tuberías de las casas, iniciando la degradación de la materia orgánica antes de llegar a la planta de tratamiento.

A continuación, el agua pasa por un sistema de coagulación y floculación, donde se añade hidroxicloriguro de aluminio para aglomerar partículas finas en una concentración de 3 mg/L (Alarcón 2023). El agua entra luego en un tanque de sedimentación donde los flóculos formados durante la coagulación se depositan en el fondo del tanque. El agua clarificada es filtrada a través de filtros de arena eliminando partículas restantes. Finalmente, el agua pasa por un sistema de desinfección donde se aplica hipoclorito de sodio al 13% que se vende comercialmente para asegurar la eliminación de patógenos restantes en una concentración de 0.87 L/h (Water Apps. s.f). Finalmente, el agua es almacenada para su distribución. Este proceso no solo trata y limpia las aguas residuales, pero a su vez, permite que sea apta para el consumo humano.

### 3.2.2.2 Diagrama de flujo.

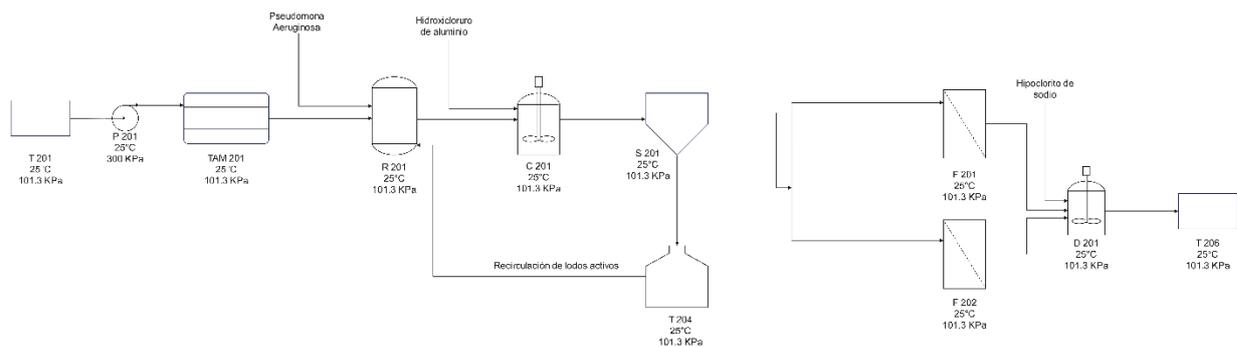


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de potabilización de agua. La descripción de cada equipo se encuentra en el anexo A

### 3.3 Balance de masa

#### 3.3.1 Balance de masa EM.

Se realizó el balance de masa teniendo en cuenta la producción de microorganismos para 7 días que dura el tiempo de activación y así obtener 20 microencapsulaciones de 0.05 g cada una, por cada 100 gramos de lavavajillas. La alimentación es a base de melaza 5% y agua 90% que se añaden a 5% de EM comerciales. El balance está hecho a base de las cantidades necesarias de materia prima para una semana.

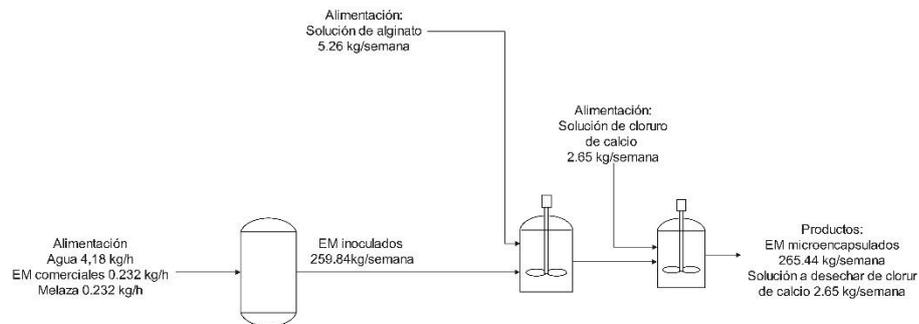


Figura 5. Balance de masa EM encapsulados

#### 3.3.2 Balance de masa lavavajillas.

A partir de la formulación y los porcentajes de cada materia prima se realizó el balance de masa del lavavajillas biodegradable para una producción de 400.74 kg/h de lavavajillas.

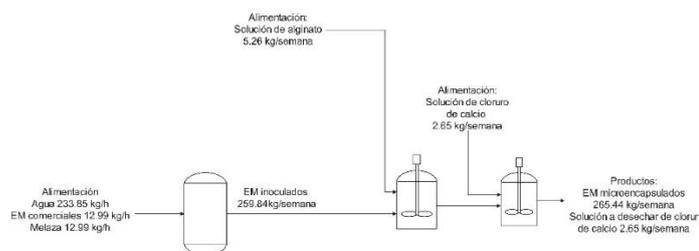


Figura 6. Balance de masa para la producción de lavavajillas biodegradable

### 3.3.3 Balance de masa del proceso de potabilización de agua.

El balance se realizó a partir del caudal de entrada a la planta de 57,812.5 kg/h de agua usada por la comunidad. La cantidad de sólidos suspendidos de las aguas residuales domésticas encontrados en investigaciones anteriores (1,400 mg/L) es de 81.13 kg/h de los cuales el 2% son sólidos grandes (Ministerio de Ambiente Colombia, s/f) que podrían ser descartados en la etapa de tamizado. Además, se realizó el cálculo de la producción de lodos activos considerando que el 85 % de los sólidos suspendidos se eliminan en el biorreactor, el otro 15 % en la sedimentación (Grupo Arca 2022) y se desecha la totalidad de lodos activos en el sedimentador. Se asumió que el 97% de los lodos activados son agua en el proceso de sedimentación y que no existen pérdidas en el proceso de aeración y filtración. Se consideró una recirculación de los lodos activados para mantener siempre una concentración de 3000 mg/L de sólidos suspendidos en el tanque de aeración y que considerando que los lodos de desechos son el 2% de los lodos activados. Los cálculos detallados se encuentran en el Anexo B.

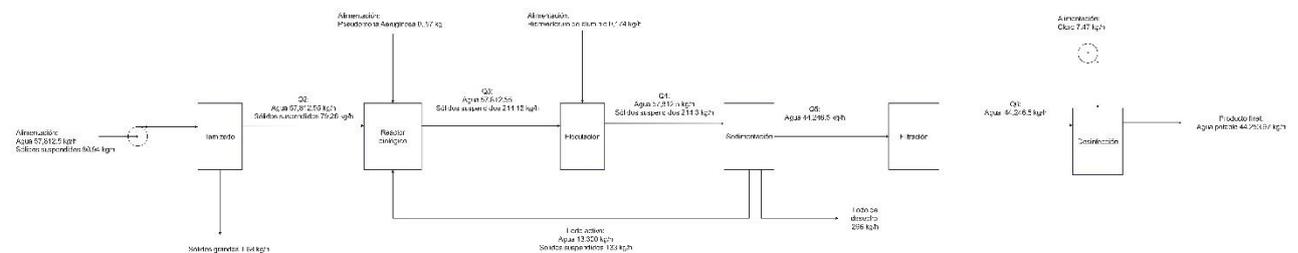


Figura 7. Balance de masa planta de potabilización de agua

## 4. DISEÑO DE LA PLANTA DUAL

### 4.1 Selección de equipos

#### 4.1.1 Tanques de almacenamiento.

Los tanques de almacenamiento de toda la planta del lavavajillas serán tanques cilíndricos contruidos en acero inoxidable para evitar corrosión y desgaste y operarán a temperatura y presión ambiental. Cada tanque está diseñado según el caudal de almacenamiento para 7 días de producción,

Las piscinas de almacenamiento T 201, T 202 y T 203 serán piscinas de concreto armado con un revestimiento de geomembrana de polietileno de alta densidad HDPE (High density polyethylene) ya que este es el material menos costoso que soporta grandes volúmenes de agua y evita filtraciones.

#### 4.1.2 Biorreactores.

El biorreactor R101 será el biorreactor encargado de la activación de EM. Será un biorreactor aeróbico de acero inoxidable con dos impulsores de tipo Rushton que ayudan a la circulación del aire dentro del biorreactor (Metcalf y Edy s.f).

El biorreactor R 201 para el cultivo de *Pseudomonas aeruginosa* dentro del proceso de potabilización de agua será un tanque de aireación será de concreto con nuevamente un revestimiento de HDPE, además tendrá en el fondo del tanque difusores de burbuja fina de tipo discos en membranas de EPDM (caucho de etileno-propileno-dieno) o silicona, que son materiales resistentes al desgaste y a la acumulación de sólidos (Metcalf y Edy s.f) el agua permanecerá según los cálculos del anexo B: 10 horas dentro del tanque y tendrá un sistema de recirculación de lodos activados para que la dosis de microorganismos sea necesaria una sola vez.

#### **4.1.3 Tanques de agitación.**

Los tanques de mezcla y agitación de la planta de lavavajillas M 101, M 102, M103, M 104, A 101 y ECP 101 (encapsulador) serán tanques de acero inoxidable trabajando a temperatura y presión ambiental y tendrán impulsores de palas para permitir un mezclado correcto para el lavavajillas con alta viscosidad.

El tanque de desinfección de la planta de potabilización D 201 y el tanque de coagulación C 201 serán tanques rectangulares de concreto con recubrimiento HDPE y agitación por impulsores de palas que permitan la correcta homogenización del hipoclorito de sodio y del hidroxiclورو de aluminio respectivamente.

#### **4.1.4 Banda transportadora.**

La banda transportadora utilizada para transportar la carboximetilcelulosa será un tornillo sin fin de acero inoxidable para evitar la corrosión y la abrasión de la carboximetilcelulosa. El tornillo infinito es una forma eficiente y económica de transportar un polvo tan fino.

#### **4.1.5 Tamizador.**

El tamizador será una barra de tamiz estático con una malla fija de 1 a 5 milímetros y una malla fina de 0.5 a 1 milímetro hechas de acero inoxidable para evitar corrosiones.

#### **4.1.7 Sedimentador.**

El sedimentador será rectangular de concreto reforzado con recubrimiento HDPE y canales de drenaje y recirculación al tanque de aireación en el fondo del sedimentador.

#### **4.1.8 Filtros de arena.**

Se utilizarán dos filtros de arena de lecho rápido a base de arena sílice y grava en paralelo F F201 y F 202 para evitar la saturación de los filtros. Los filtros serán de arena sílice y grava y tendrán la tecnología de retro lavado para poder limpiar los filtros constantemente y evitar deterioro y saturación.

#### **4.1.9 Bombas.**

Las bombas centrífugas de toda la planta dual serán hechas en acero fundido y diseñadas para crear un aumento de presión moderado en cada proceso:

- **Aguas por tratar (PTAR) P 201:** El agua aún no tratada puede requerir un incremento mayor de presión, típicamente entre 1 y 2 atm.
- **Lavavajillas (Mezcla de ingredientes) P 101, P 102, P 103, P104, P 105, P 106, P 107, P 109:** La mezcla de ingredientes para el lavavajillas generalmente requiere un incremento de presión bajo, entre 0.5 y 1 atm.

La bomba dosificadora de los microorganismos eficientes encapsulados será una bomba peristáltica con una carcasa de polipropileno y juntas y sellos de EPDM.

#### **4.1.10 Laboratorio de control de calidad.**

Un laboratorio de control de calidad de agua potable debe contar con equipos para análisis fisicoquímicos y microbiológicos como pH-metros, turbidímetros, conductímetros, espectrofotómetros UV-Vis y kits de análisis microbiológico, complementados con termómetros digitales, estufas, balanzas analíticas, autoclaves y filtros de vacío. Los materiales deben ser duraderos, como vidrio borosilicato, acero inoxidable o plásticos resistentes. Es esencial disponer de utensilios como vasos de precipitado, matraces, pipetas, y cajas de Petri, mobiliario, equipos de emergencia y cuidado personal y sistema de ventilación

## **4.2 Dimensionamiento**

El dimensionamiento de los equipos se realizó considerando los requerimientos del proceso, aplicando factores de seguridad, balances de masa y energía, y criterios de diseño basados en normas internacionales. Se optimizaron los costos seleccionando materiales como acero inoxidable y concreto revestido, adecuados para los fluidos manejados. Los resultados, que incluyen capacidades de almacenamiento, volúmenes de reactores y áreas de filtración, están detallados en el Anexo C junto con las especificaciones técnicas y costos analizados en diferentes proveedores, asegurando un diseño eficiente y compacto que cumple con los objetivos del proyecto.

## **4.3 Consumo energético**

El consumo energético se realizó mediante las fórmulas para cada operación unitaria especificadas en el anexo D. En primer lugar, se realizaron los respectivos cálculos para las bombas. A partir del consumo energético se buscaron bombas comerciales con un consumo energético parecido. Adicionalmente se determinó el consumo energético de los otros equipos mediante la búsqueda de equipos parecidos en diferentes proveedores como se observa en el anexo D. Sumando las potencias de cada equipo analizado en el Anexo obtenemos que el consumo energético de la planta anualmente será de aproximadamente 25,894.4 kW.

## **4.4 Layout de la planta**

Para la realización del layout de la planta, no solo se tomó en cuenta el tamaño de los equipos, pero también áreas adicionales como parqueaderos, oficinas administrativas, laboratorios de control de calidad y zonas de almacenamiento de producto terminado. Las áreas fueron calculadas según el anexo E y se resumen de la siguiente manera:

Tabla 2. Dimensionamiento áreas auxiliares.

<b>Área</b>	<b>Dimensión Aproximada</b>
Parqueaderos	95 m <sup>2</sup>
Oficinas Administrativas	40 m <sup>2</sup>
2 Laboratorios de Control	60 m <sup>2</sup>
Zona de Almacenamiento	90 m <sup>2</sup>

Adicionalmente, se consideró utilizar el menor espacio posible entre equipos para reducir costos de tuberías, pero asegurar una distancia suficiente y evitar accidentes. De esta manera se obtiene una planta de un área total aproximada de 750m<sup>2</sup> como se observa en el anexo E.

## 5. ANÁLISIS DE SEGURIDAD

El análisis de Peligros y Operabilidad (HAZOP) es una técnica que surgió en 1963 en Imperial Chemical Industries (ICI) para identificar riesgos en el diseño de plantas químicas. HAZOP consiste en analizar las desviaciones de las variables del proceso respecto a sus valores normales, buscando causas y consecuencias de posibles accidentes. Esta metodología utiliza “palabras guía” de posibles desviaciones para analizar posibles causas y mitigaciones del riesgo de “nudos” o etapas claves del proceso. Este análisis de seguridad se realizó mediante esta metodología definiendo los nudos claves de la planta dual y evaluando los riesgos y mitigación de estos como se puede ver detalladamente en el anexo F. Los diagramas de tuberías e instrumentación (PI&D) fueron diseñados para asegurar un monitoreo y control centralizados, minimizando riesgos y mejorando la eficiencia operativa. A continuación, se describen los principales sistemas:

- **Tanque de melaza y agua (T101):** Equipado con sensores de nivel y caudal para evitar sobrellenado y mantener un flujo constante.
- **Biorreactor de EM (R101):** Incluye controladores de temperatura y oxígeno para asegurar condiciones óptimas de crecimiento.
- **Encapsulador de EM (ECP101):** Sistema de dosificación precisa con controladores de flujo y monitoreo continuo.
- **Tamiz:** Proporciona limpieza automática y purga de sólidos para evitar obstrucciones.
- **Reactor biológico (R201):** Monitorea temperatura y pH, con recirculación de lodos para mantener concentraciones adecuadas.
- **Coagulador/Floculador (C201):** Ajusta la dosis de coagulante según el caudal de entrada, optimizando la formación de flóculos.

- **Filtros de arena (F201/F202):** Controlan el flujo para garantizar una filtración eficiente y evitan saturaciones.
- **Tanque de desinfección (D201):** Dosifica hipoclorito con sensores de caudal para mantener niveles adecuados de desinfección.

Los detalles completos del análisis y medidas de seguridad están disponibles en el anexo F correspondiente, asegurando la confiabilidad del diseño.

## 6. ANÁLISIS ECONÓMICO

En esta sección se mostrarán los resultados de la estimación del costo total de la planta, como son: capital fijo, de trabajo, costos de producción y los ingresos esperados según. Con ello se estimará la rentabilidad de la planta y el tiempo de recuperación a partir del análisis económico de Towler y Sinnott (2008).

### 6.1 Estimación de costos de la planta de producción

Para la estimación de los costos de la planta es necesario tener en cuenta el dimensionamiento de los equipos en la sección 4.2. Esta estimación calcula los costos ISBL en base al costo de los equipos, por lo tanto, se utilizaron los métodos de Lang, Hand y factorial detallado, El método de Hand considera el tipo de equipo y material del que este hecho, mientras que el método de Lang consiste en un análisis del tipo de procesamiento que van a realizar los equipos. Por último, el método factorial detallado utiliza los factores específicos mixtos del proceso. En la siguiente tabla se muestra un resumen de los costos de la planta obtenidos para los equipos principales que se utilizaran.

Tabla 3. Resumen de los costos de la planta

<b>Método utilizado</b>	<b>Costo de la planta (USD)</b>
LANG	552,083.16
HAND	235,655.20
DETALLADO	276,041.58

Una vez obtenidos los valores se obtuvo el valor del ISBL (Inside battery limits) como se indica en el anexo G.

## 6.2 Inversión de capital Fijo

Una vez obtenido el ISBL se calculó la inversión de capital fijo de la planta como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4. Resumen de la inversión de capital fijo

Concepto	Fórmula	Valor (USD)
ISBL	Promedio método Hand y detallado	261,906.35
OSBL	$0.4 * \text{ISBL}$	104,762.54
Ingeniería y Construcción	$0.15 * \text{ISBL}$	39,285.95
Imprevistos	$(0.1) (1.4 * \text{ISBL})$	36,666.89
Terreno	Costo del terreno de la PTAR anterior	571,000
<b>Total Inversión de Capital Fijo</b>	Suma Total	<b>656,857.03</b>

## 6.3 Inversión de capital del trabajo

A partir del anexo G se obtuvieron los siguientes resultados teniendo en cuenta el costo de las materias primas, el sueldo de los trabajadores, el costo de energía de la planta y el costo de mantenimiento.

Tabla 5. Resumen costos de capital de trabajo anual

<b>Concepto</b>	<b>Costo Anual (USD)</b>	<b>Tipo de Costo</b>
Costos de Materias Primas	7,141,293.52	Variable
Costo de Energía	5,437.82	Variable
<b>Total Egresos Variables</b>	<b>6,458,945.36</b>	-
Costo de Salarios (Total)	267,960.00	Fijo
Costo de Mantenimiento	13,095.32	Fijo
<b>Total Egresos Fijos</b>	<b>286,493.32</b>	-
<b>Total Egresos Anuales</b>	<b>6,745,438.68</b>	-

#### 6.4 Estimación de ingresos

Actualmente en Colombia el m<sup>3</sup> de agua tiene un costo de 0.020 \$, mientras que el kilogramo de lavavajillas biodegradables ya existentes en el mercado está alrededor de los 5\$ y 7\$. En este caso para que nuestro producto sea competitivo tendrá un costo de 6.60\$ (según el análisis de sensibilidad del anexo H) que cumple con el rango de precios y que además cumple con una ganancia del 68%. Por lo tanto, los ingresos anuales obtenidos de la planta son los siguientes:

Tabla 6. Estimación de ingresos anuales

<b>Producto</b>	<b>Cantidad anual</b>	<b>Precio de venta</b>	<b>Ingreso anual (USD)</b>
Agua potable	505,125 m <sup>3</sup>	0.020 USD/m <sup>3</sup>	10,102.5
Lavavajillas	1,090,000 kg	6.6 USD/kg	7,194,000.00
<b>Ingreso total anual</b>			<b>7,204,102.5</b>

## 6.5 Análisis de rentabilidad

Se planeó un año de construcción de la planta con una tasa de interés del 9.75% un periodo de recuperación de la inversión de 10 años. De esta manera se obtuvo el siguiente flujo de caja acumulado.

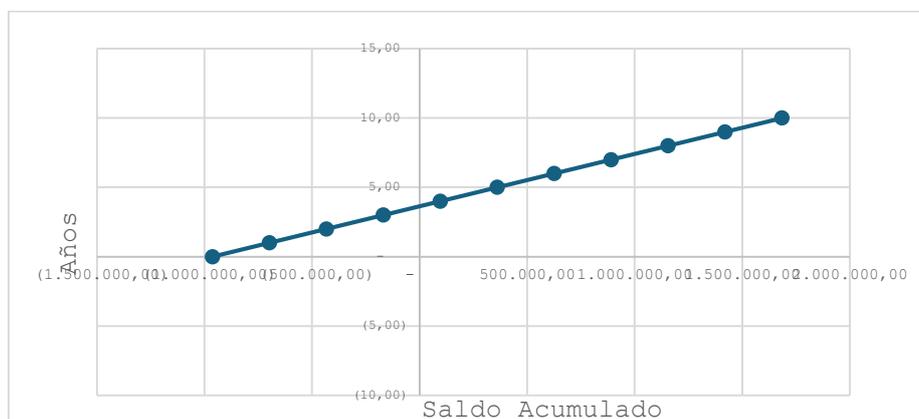


Figura 16. Evolución del saldo en función del tiempo

A partir del flujo de caja se obtuvo el VAN, el TIR y el tiempo de recuperación del proyecto.

Tabla 7. Resumen del análisis de recuperación

Concepto	Resultado
VAN (Valor Actual Neto)	990,067.78\$
TIR (Tasa Interna de Retorno)	40.3%
Tiempo de Recuperación	4.56 años

El análisis financiero muestra un VAN de 990,067.78\$ USD y una TIR del 29.92%, con un periodo de recuperación de 4.56 años. Si no se vende el 100% de la producción, los precios podrían ajustarse a 7 USD para el 95%, 7.43 USD para el 90% o 7.82 USD para el 85% de la producción.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 Conclusiones

El presente trabajo demuestra que la implementación de una planta dual de lavavajillas biodegradables y potabilización de agua es una solución integral y sostenible para Barichara. El proyecto reduce la contaminación hídrica y garantiza acceso a agua potable, además de generar nuevas fuentes de trabajo e ingresos. La formulación del lavavajillas biodegradable incluye tensioactivos y conservantes compatibles con los EM, asegurando una limpieza efectiva y un pretratamiento eficiente. La selección y dimensionamiento de los equipos aseguran eficiencia, durabilidad y un tamaño óptimo de la planta (750 m<sup>2</sup>).

Mediante la metodología HAZOP se identificaron riesgos clave y se propusieron medidas de mitigación mediante sistemas de control y mantenimiento. El análisis económico confirmó la rentabilidad del proyecto, con un tiempo de recuperación de menos de cinco años, aunque la sostenibilidad financiera depende de las ventas del lavavajillas biodegradable, ya que el costo del agua potable es insuficiente para cubrir los gastos.

En conclusión, este proyecto no solo satisface una necesidad crítica en la comunidad, sino que también establece un modelo replicable que impacta positivamente las áreas social, económica y ambiental, marcando un paso hacia un futuro más sostenible.

### 7.2 Recomendaciones

Es clave analizar el rendimiento de los microorganismos eficientes (EM), que eliminan más del 99% de coliformes, para mejorar la calidad del agua y reducir costos. Se sugiere reducir el tiempo de residencia en el tanque de aireación y evaluar la eliminación de la sección de desinfección, simplificando el proceso. Además, el laboratorio debe realizar pruebas fisicoquímicas y microbiológicas regulares para garantizar la calidad del agua.

Se recomienda investigar la interacción entre EM y tensioactivos en los lavavajillas, así como explorar nuevas formulaciones con tensioactivos más económicos como el ácido sulfónico lineal. Finalmente, es esencial realizar un análisis de mercado detallado y establecer una red de distribución para asegurar la viabilidad y alcance del proyecto.

## 8. REFERENCIAS

Aquae Foundation. 2022. “¿Cómo se distribuye el agua dulce y salada?” 2022.

Alarcón, Juan Carlos. 2023. “Determinación de la dosis óptima de coagulante y floculante hidroxiclorigenato de aluminio en función de la turbiedad y el color para la potabilización del río guayas”.

Ayilara, Modupe S., y Olubukola O. Babalola. 2023. “Bioremediation of environmental wastes: the role of microorganisms.” *Frontiers in Agronomy*. Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1183691>.

Baquerizo, Martha Acuña, María Luisa Solis-Casto, María Edith. 2019. “Contaminación de los ríos: caso río Guayas y sus afluentes”. *Revista de investigación científica El Manglar* 16 (1).

Bravo Aláva, Rubén Darío, y Mary Cristina Giler Bravo. 2016. “ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA AGROPECUARIA DE MANABÍ MANUEL FÉLIX LÓPEZ TESIS PREVIA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MEDIO AMBIENTE TEMA: EFICIENCIA DE CONSORCIOS MICROBIANOS (IN VITRO) EN”. Calaceta: ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA AGROPECUARIA DE MANABÍ MANUEL FÉLIX LÓPEZ.

Cabildo de Barichara. 2024. “Unidos por el agua de Barichara”. Barichara: Conferencia presencial septiembre 2024.

Cabrera Bermúdez, Cuba, Fleites Ramírez, y Contreras Moya. 2009. “ESTUDIO DEL PROCESO DE COAGULACIÓN FLOCULACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE LA EMPRESA TEXTIL ‘DESEMBARCO DEL GRANMA’ A ESCALA DE LABORATORIO”. *Tecnología Química* XXIX (3): 64–73. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543760009>.

- CANALES LÓPEZ, HUBERT OMAR, y AMIRO ANTONIO SEVILLA CARPIO. 2016. “EVALUACIÓN DEL USO DE MICROORGANISMOS EFICACES EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DOMESTICOS RESIDUALES DEL DISTRITO DE PÁTAPO”. Lambayeque Perú: ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA Pedro Ruiz Gallo.
- Carrión, Francisco Javier. 2006. “INFLUENCIA DE LAS MEZCLAS DE POLIGLUCÓSIDO CON TENSIOACTIVO ANIÓNICO EN EL LAVADO DE TEJIDO DE POLIÉSTER”. *Intexter UPC*.
- Corrales Ramírez, Lucía Constanza, Yurley Natalia Santamaria Mosquera, Dario Alberto Luccioli Peña, and Miguel Angel Castañeda Casas. 2021. “Evaluación de La Calidad Del Agua de La Vereda Río Suárez de Puente Nacional, Santander.” *Nova* 19 (37): 79–98. <https://doi.org/10.22490/24629448.5497>.
- Durán, Gabriela. 2023. “Desarrollo y Caracterización de Una Metodología de Microencapsulación Por Emulsión de Aceites Vegetales a Partir de Alginato de Sodio.” Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Duarte Chaparro, Camilo Esteban, y Diego Arturo Guerrero Tarquino. 2017. “DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE PARA EL MUNICIPIO DE TIPACOQUE, BOYACÁ”. Bogotá, Colombia: Universidad Libre.
- Grupo Arca. 2022. “Lodos activados: qué son y en qué consiste este proceso”. <https://grupoacura.com/es/blog/lodos-activados/>. 2022.
- ICONTEC, and Ministerio de Salud Pública de Colombia. 2008. “Normas Oficiales Para La Calidad Del Agua Colombia NORMA TECNICA COLOMBIANA.
- Mat Saad, Azlina, Fadli Fizari Abu Hassan Asari, Salwani Affandi, y Azlina Zid. 2022. “RIVER POLLUTION: A MINI REVIEW OF CAUSES AND EFFECTS”. *Journal of*

*Tourism, Hospitality and Environment Management* 7 (29): 139–51.

<https://doi.org/10.35631/jthem.729011>.

Metcalf, y Eddy. s/f. *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*, Volumen 2, 3ra Edición.

Ministerio de Ambiente Colombia. s/f. “ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO MEDIO Y BAJO SUÁREZ-NSS (2401-02) DOCUMENTO FASE DIAGNOSTICO RESUMEN EJECUTIVO”.

Olenka, Melanie, Tapia Levano, Johana Melissa Guerreros, Torres Código, Asesor Luis, Jesús Córdova, and Aguirre Lima -Perú. 2012. “ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA INSTALACIÓN DE UNA PLANTA PRODUCTORA DE DETERGENTE LAVAVAJILLA ECOLÓGICO.” Lima, Perú: Universidad de Lima.

POCHTECA Chile. 2020. “COCOAMIDO PROPIL BETAINA”. Chile. [www.pochteca.net](http://www.pochteca.net).

Redacción Semana. 2024. “Por escasez de agua, Barichara lidera una nueva propuesta de turismo verde”. *Semana*, el 16 de junio de 2024.

Ríos, Jorge. 2024. “Barichara recibe planta de agua de la Cruz Roja para enfrentar crisis”. *Vanguardia*, el 10 de junio de 2024.

Romero López, Teresita de Jesús, y Daniel Vargas Mato. 2017. “Uso de microorganismos eficientes para tratar aguas contaminadas”. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* 38 (3): 88–100. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382017000300008&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382017000300008&lng=es&nrm=iso&tlng=es).

Towler, Gavin, Ray Sinnott, Amsterdam • Boston, • Heidelberg, • London, Paris • San, Diego San, Francisco • Singapore, y Sydney • Tokyo. 2008. “CHEMICAL ENGINEERING DESIGN Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design”. <http://elsevier.com>.

Valdivia-Rivera, Sergio, Teresa Ayora-Talavera, Manuel Alejandro Lizardi-Jiménez, Ulises García-Cruz, Juan Carlos Cuevas-Bernardino, y Neith Pacheco. 2021. “Encapsulation of microorganisms for bioremediation: Techniques and carriers”. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09577-x>.

Ximena, María, Mendoza Zapata, Julianna Salazar Orozco, Anuar Duván, Borja Machado, Richard, Hernando Leguizamo Mesa, Richard Hernando, y Leguizamo Mesa. s/f. “DISEÑO, DESARROLLO Y FORMULACIÓN DE JABÓN LÍQUIDO BIODEGRADABLE PARA EL LAVADO DE VAJILLAS”. Medellín: Universidad CES.

## ANEXO A. DISEÑO DEL PROCESO

La formulación se realizó en base a literatura para obtener porcentajes ideales de cada compuesto y materia prima completamente biodegradable.

Tabla 8. Tabla de la formulación en porcentaje del lavavajillas biodegradable

Componente	Función	Concentración (%)
Betaína de coco	Tensioactivo, suavizante	8
Alquil poliglucósido (APG)	Tensioactivo, suavizante, desengrasante	8
Alfa olefín sulfonato de sodio (AOS)	Tensioactivo, desengrasante	15
Glicerina Vegetal	Suavizante, protector de piel	5
Carboximetilcelulosa (CMC)	Gelificante, Espesante	1.5
Benzoato de sodio	Conservante	0.5
Sorbato de potasio	Conservante	0.5
Ácido cítrico	Regulador de pH	0.2
EDTA	Quelante	0.3
EM (encapsulados)	Biodegradación, eliminación de contaminantes	1
Aroma natural	Aporta aroma	1
Agua	Diluyente	59
	Total (%)	100

A partir de los diagramas de flujo se nombraron los equipos tanto para la producción del lavavajillas como para la potabilización de agua de la siguiente manera:

Tabla 9. Tabla de la descripción de los equipos según el código de diagrama de flujo para producción de lavavajillas biodegradable con EM

<b>Código</b>	<b>Nombre del Equipo</b>	<b>Código</b>	<b>Nombre del Equipo</b>
T 101	Tanque de almacenamiento melaza y agua	P 101	Bomba de alimentación de melaza y agua
T 102	Tanque de almacenamiento de glicerina	P 102	Bomba de alimentación de glicerina
T 103	Tanque de almacenamiento de carboximetilcelulosa	SC 101	Banda transportadora de alimentación de carboximetilcelulosa
T 104	Tanque de almacenamiento de agua	P 103	Bomba de alimentación de agua
T 105	Tanque de almacenamiento de betaína de coco	P 104	Bomba de alimentación betaína de coco
T 106	Tanque de almacenamiento de alquil poliglucósido	P 105	Bomba de alimentación alquil poliglucosido
T 107	Tanque de almacenamiento de alfa olefin sulfonato de sodio	P 106	Bomba de alimentación de alfa olefín sulfonato de sodio
R 101	Bioreactor cultivo <i>Saccharomisie cerevisiae</i>	P 107	Bomba dosificadora de microcapsulas EM
T 109	Tanque de almacenamiento Microorganismos eficientes inoculados	P 108	Bomba EM inoculados
A 101	Agitador	ECP 101	Encapsulador
M 101	Mezclador de disolución	M 103	Homogenizador
EN 101	Máquina envasadora	M 104	Mezclador regulador de pH

Tabla 10. Tabla de la descripción de los equipos según el código del diagrama de flujo de potabilización de agua

<b>Código</b>	<b>Nombre del Equipo</b>
TAM 201	Tamiz
P 201	Bomba de alimentación de agua residual
P 202	Bomba para evacuar lodos
R 201	Tanque de aireación y biorreactor con Pseudomonas aeruginosa
C 201	Coagulador/Floculador
S 201	Unidad de Sedimentación
F 201	Filtro de arena
F 202	Filtro de arena
D-201	Unidad de Desinfección
T 201	Piscina de almacenamiento de agua residual
T 202	Piscina de almacenamiento de lodos
T 203	Piscina de almacenamiento agua potable

## ANEXO B. BALANCE DE MASA TRATAMIENTO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA

El balance de masa se realizó a partir de las concentraciones más comunes de tratamientos y potabilización de agua del libro “Ingeniería de las aguas Residuales” de Metcalf y Eddy 1995.

A partir de los siguientes datos se realizó el balance de masa del tanque de aireación y de la recirculación de lodos activados

Tabla 11. Datos iniciales para balance de masa

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades	Descripción
Caudal de agua de entrada	Q	1.387.488	L/día	Caudal de agua de entrada al sistema
Concentración de sólidos en agua de entrada	X <sub>0</sub>	1400	mg/L	Concentración de sólidos suspendidos en el agua de entrada
Concentración de sólidos en el flujo de recirculación típica	X <sub>r</sub>	1000	mg/L	Concentración de sólidos en el flujo de recirculación
Concentración sólidos en suspensión volátiles (80%*X)	X	2400	mg/L	
Velocidad específica de crecimiento de Pseudomonas	μ	0.28	h <sup>-1</sup>	Tasa de crecimiento de los microorganismos
Concentración de sólidos en el reactor típica	X	3000	mg/L	Concentración de sólidos suspendidos en el reactor
Demanda biológica de oxígeno DBO <sub>5</sub> a la entrada de la planta	S <sub>0</sub>	366	mg/L	
DBO <sub>5</sub> requerido a la salida del tratamiento	S	80	mg/L	
Coefficiente de crecimiento	Y	0.65		
Coefficiente de mortandad	K	0.06	mg/L DBO <sub>5</sub>	

El primer paso por realizar es obtener el volumen del reactor para así calcular la tasa de crecimiento del microorganismo mediante la siguiente fórmula:

$$Vr = \frac{Q \cdot \theta c \cdot Y \cdot (S_0 - S)}{X(1 + K \cdot \theta c)} \quad [1]$$

$$Vr = \frac{1,387,488 \cdot 10 \cdot 0.6 \cdot (286)}{3000(1 + 0.06 \cdot 10)} = \frac{2,380,929,408}{2400.6} \quad [2]$$

$$Vr = 620.033,7 \text{ L} \quad [3]$$

$$Vr = 62 \text{ m}^3 \quad [4]$$

Adicionalmente, calculamos el tiempo de residencia del acudal mediante la fórmula:

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{620,033.7 \text{ L}}{963.54 \frac{\text{L}}{\text{min}}} = 643 \text{ min} = 10 \text{ horas} \quad [5]$$

Una vez obtenido el volumen se puede calcular la tasa de crecimiento de *Pseudomona aeruginosa* de la siguiente manera:

$$Tasa = \mu \cdot X_1 \cdot V = 0.2 \text{ h}^{-1} \cdot 3000 \frac{\text{mg}}{\text{h}} \cdot 62.033,7 \text{ L} = 52,920 \frac{\text{mg}}{\text{h}} \quad [6]$$

Una vez teniendo estos datos se puede hacer un balance general en estado estacionario de la siguiente manera:

$$Entrada = Salida \quad [7]$$

$$Q \cdot X_0 + Q_r \cdot X_r + Tasa \text{ de crecimiento} = (Q + Q_r + Q_d) \cdot X_1 \quad [8]$$

Siendo  $Q_r$  el caudal de recirculación de lodos activos y  $Q_d$  el caudal de desecho de lodos que equivale al 2% de los lodos activados de recirculación (Metcalf & Eddy 1995). De esta manera despejamos  $Q_r$  de la siguiente manera.

$$Q_r = \frac{(Q + Q_r + 0.02Q_r) \cdot X_1 - (Q \cdot X_0) - \text{Tasa de crecimiento}}{X_r} \quad [9]$$

$$Q_r = \frac{(67,812 + Q_r + 0.02Q_r) \cdot 3000 - (57,812 \cdot 1,400) - 52,929}{1000} \quad [10]$$

$$Q_r = 13,300 \frac{L}{h} \quad [11]$$

$$Q_d = 266 \frac{L}{h} \quad [12]$$

Adicionalmente, en base a investigaciones pasadas, existen sólidos suspendidos que pueden ser removidos en el tamiz que equivalen al 2% de los sólidos suspendidos totales, es decir 1.68 kg/h son descartados en la etapa de tamizado

A continuación, una tabla de los resultados totales del balance de masa

Tabla 12. Resultados finales del balance de masa:

<b>Parámetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>	<b>Descripción</b>
Sólidos removidos Tamizado	-	1.68	kg/h	Sólidos que se remueven en el pretratamiento
<b>Flujo de Recirculación</b>				
Caudal de recirculación	$Q_r$	13,3	L/h	Caudal de recirculación
Concentración de sólidos en el flujo de recirculación	$X_r$	10	mg/L	Concentración de sólidos en el flujo de recirculación
Sólidos suspendidos en el flujo de recirculación	$Q_r \cdot X_r$	133	mg/h	Sólidos suspendidos en el flujo de recirculación
<b>Flujo de Desecho</b>				
Caudal de desecho	$Q_d$	266	L/h	Caudal del flujo de desecho
Concentración de sólidos en el flujo de desecho	$X_d$	305,037. 6	mg/L	Concentración de sólidos en el flujo de desecho (calculada)
Sólidos suspendidos en el flujo de desecho	$Q_d \cdot X_d$	81,134	mg/h	Sólidos suspendidos en el flujo de desecho
<b>Sólidos suspendidos totales en la salida</b>	$(Q + Q_r + Q_d) \cdot X$	214,134	mg/h	Sólidos suspendidos totales en la salida

## ANEXO C. DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA

### *Dimensionamiento de tanques de almacenamiento cilíndricos y tanques de agitación*

Los tanques de almacenamiento se dimensionaron a partir del caudal y la densidad de cada materia prima de la siguiente manera:

$$V = \frac{Q}{\rho} \quad [13]$$

Donde V es el volumen en m<sup>3</sup>, Q el caudal en kg/semana y la densidad en kg/m<sup>3</sup>

Una vez obtenido el volumen se determinó el tamaño del tanque según su forma. Para los tanques cilíndricos se planteó un radio inicial y se determinó la altura

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad [14]$$

$$h = \frac{V}{\pi \cdot r^2} \quad [15]$$

Donde h es la altura y r el radio en metros

Para las piscinas de almacenamiento rectangulares y sedimentador el dimensionamiento se realizó en función de la siguiente fórmula:

$$V = l \cdot w \cdot h \quad [16]$$

Donde l es el largo, w la profundidad y h la altura en metros.

Para los equipos de la planta de potabilización de agua se determinó el volumen según el tiempo de retención del caudal en cada equipo:

$$V = \frac{Q}{\tau} \quad [17]$$

Para el coagulador y el sedimentador se conocen que los tiempos de retención típicos son de 0.5 h y 2.5 h respectivamente. Una vez obtenido el volumen se realizó el dimensionamiento asumiendo una altura y una profundidad para así obtener el largo de la siguiente forma:

$$l = \frac{V}{w \cdot h} \quad [18]$$

#### *Dimensionamiento tamizado y filtros de arena*

Utilizando la ecuación 17 se obtuvo el volumen de los equipos teniendo en cuenta que el tiempo de retención común del tamizador en una planta de tratamiento de aguas es de 5 minutos (0.08 h) y de los filtros de arena de aproximadamente 1.5 horas. A partir del volumen se obtuvo el área de los filtros y del tamizador teniendo en cuenta que la velocidad de filtración es de 10 m/h.

$$A = \frac{Q}{v} \quad [19]$$

#### *Dimensionamiento biorreactor*

El volumen biorreactor R 101 se calculó teniendo en cuenta los siguientes parámetros para los microorganismos eficientes realizando un promedio de todos los microorganismos presentes en el consorcio.

Tabla 13. Parámetros de crecimiento microorganismos eficientes

<b>Microorganismo</b>	<b>Rendimiento (Y) (g biomasa/g sustrato)</b>	<b>Coefficiente Específico de Crecimiento (<math>\mu</math>) (<math>h^{-1}</math>)</b>	<b>Producción de Masa Promedio X (g/L)</b>
Bacterias Ácido Lácticas	0.75	0.3	12.5
Levaduras	0.5	0.25	5.5
Bacterias Fotosintéticas	0.55	0.175	2.75
<b>Promedio General</b>	<b>0.6</b>	<b>0.242</b>	<b>6.91</b>

A partir de estos datos obtenemos el volumen del bioreactor de la siguiente manera

$$V = \frac{P}{r} \quad [20]$$

Donde r es la productividad específica y P es la producción por hora.

La productividad específica se calcula como:

$$r = \mu \cdot X \quad [21]$$

$$r = 0.242 \cdot 6.91 \quad [22]$$

$$r = 1.67 \quad [23]$$

P se define con la cantidad de microorganismos a producir es decir 259.84 kg/semana de EM inoculados, es decir 1.54 kg/h o 1540 g/h, por lo tanto, el volumen del biorreactor es de 922L es decir 0.9 m<sup>3</sup>.

Finalmente se obtuvieron los resúmenes finales según el tamaño y el costo de cada equipo de la siguiente manera.

Tabla 14. Dimensionamiento tanques de almacenamiento producción lavavajillas.

<b>Tanque</b>	<b>Descripción</b>	<b>Caudal (kg/semana)</b>	<b>Volumen factor de seguridad (1.2) (m3)</b>	<b>Radio (m)</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Proveedor</b>	<b>Costo (USD)</b>
T 101	Tanque de almacenamiento melaza y agua	246,84	0,30	0,5	0,38	Alibaba	1330,000
T 103	Tanque de almacenamiento carboximetilcelulosa	240,4	0,29	0,5	0,37	Alibaba	1330,000
T 104	Tanque de almacenamiento agua	9457,2	11,35	1,5	1,61	Alibaba	5274,880
T 105	Tanque de almacenamiento betaína de coco	1282	1,47	0,6	1,30	Alibaba	2376,280
T 106	Tanque de almacenamiento alquilpoliglucosido	1282	1,40	0,6	1,24	Alibaba	2376,290
T 107	Tanque de almacenamiento alfa olefín sulfonato de sodio	2404,4	2,75	0,7	1,79	Karmdoplastic	2,600
T 108	Tanque de almacenamiento EM eficientes	259.84	0,26	0,4	0,62	Alibaba	1,330

Para las piscinas de almacenamiento de la planta de potabilización de agua se tomó en cuenta para el costo que el concreto armado tiene un costo de 120 \$/m<sup>3</sup> y el revestimiento de HDPE de 10 \$/m<sup>2</sup>.

Tabla 15. Dimensionamientos tanques rectangulares planta de potabilización de agua

<b>Tanque</b>	<b>Descripción</b>	<b>Caudal (kg/h)</b>	<b>Volumen factor de seguridad (1.2) (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Largo (m)</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Costo (USD)</b>
T 201	Piscina de almacenamiento de agua residual	57,812.5	69.375	4.67	5	3	8000
T 202	Piscina de almacenamiento de lodos de desecho	266	0.399	1	1	0.4	200
T 203	Piscina de almacenamiento agua potable	44,253.96	53.104752	3.5	5	3	6300
D 201	Tanque de desinfección	44,246.5	53.0958	3.5	5	3	6300

Los tanques de agitación se dimensionaron y cotizaron y se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 16. Dimensionamiento tanques de agitación

<b>Tanque</b>	<b>Descripción</b>	<b>Caudal (kg/h)</b>	<b>Volumen factor de seguridad (1.2) (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Proveedor</b>	<b>Costo (USD)</b>
A 101	Agitador	29.04	0.027	Amazon	665
M 101	Mezclador de disolución	389.66	0.410	Todo Bodega España	2,295
M 102	Mezclador EM y alginato de sodio	4.74	0.005	Hanna instruments	296
M 103	Homogenizador	394.4	0.415	Todo Bodega España	2,295
M 104	Mezclador regulador de pH	400.74	0.421	Todo Bodega España	2,295
ECP 101	Encapsulador	4.8	0.005	Hanna instruments	296

Para el biorreactor R 101 se calculó el volumen mediante la ecuación [20] para los costos del tanque de aireación R201 se consideró de 25 difusores de 30\$ cada uno dentro del tanque para permitir una buena distribución del aire.

Tabla 17. Dimensionamiento biorreactores

<b>Equipo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Volumen factor de seguridad 1.2 (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Proveedor</b>	<b>Costo</b>
R 101	Bioreactor crecimiento microorganismos eficientes	1.1064	Alibaba	10,400
R 201	Tanque aireación Pseudomona aeruginosa	74.4	-	12,225

Finalmente, para los otros equipos de la planta de potabilización de agua se tomó en cuenta el mismo costo de los materiales mencionados anteriormente y los resultados del dimensionamiento fueron los siguientes:

Tabla 18. Dimensionamiento equipos planta de potabilización de agua

<b>Equipo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Caudal (kg/h)</b>	<b>Tiempo de retención (h)</b>	<b>Volumen factor de seguridad 1.2 (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Proveedor</b>	<b>Costo (USD)</b>
C 201	Coagulador	57,812.5	0.5	34.6875	-	-	9,725
S 201	Sedimentador rectangular	57,812.5	2.5	173.4375	-	-	23,675
T 201	Tamizador	57,812	0.08	5.549952	2.77	Alibaba	5,000
F 201	Filtro de arena y carbón activado	22,120	1.5	39.816	11.06	Riego Ecuador	4,148.67
F 202	Filtro de arena y carbón activado	22,120	1.5	39.816	11.06	Riego Ecuador	4,148.68

## ANEXO D. CONSUMO ENERGÉTICO DE LOS EQUIPOS

Para las bombas la potencia se determina como:

$$P = \frac{Q \cdot \Delta P}{\eta} [24]$$

Donde P es la potencia requerida en W,  $\Delta P$  el incremento de presión en Pa y  $\eta$  la eficiencia de las bombas que típicamente es 0.85. A partir de esta potencia se buscó proveedores que puedan brindar bombas de una potencia parecida.

Para los agitadores la potencia se calcula como

$$P = K \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D^5 [25]$$

Donde K es el coeficiente de diseño, N la velocidad de rotación (típicamente 0.5 rps) y D el diámetro del impulsor (típicamente 0.5 m).

Finalmente, para los difusores de aire del biorreactor la ecuación de potencia es la siguiente:

$$P = Q \cdot H \cdot \frac{g}{\eta} [26]$$

Donde H es la profundidad del tanque, g la gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) y la eficiencia típica de 0.8.

Finalmente estos cálculos fueron resumidos en las siguientes tablas en donde no solo se observa el consumo energético para las bombas pero también para los principales equipos tomando en cuenta los diferentes proveedores y la capacidad de cada equipo.

Tabla 19. Consumo energético bombas.

<b>Equipo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Incremento de presión máximo (Pa)</b>	<b>Potencia (kW)</b>	<b>Potencia (HP)</b>
P 101	Bomba de alimentación de melaza y agua	0.0044	100,000	0.00014	0.00019
P 102	Bomba de alimentación de glicerina	0.02003	100,000	0.00065	0.00088
P 103	Bomba de alimentación de agua	0.23643	100,000	0.00773	0.01034
P 104	Bomba de alimentación betaína de coco	0.03205	100,000	0.00105	0.00140
P 105	Bomba de alimentación alquil poliglucosido	0.03205	100,000	0.00105	0.00140
P 106	Bomba de alimentación de alfa olefín sulfonato de sodio	0.06011	100,000	0.00196	0.00263
P 107	Bomba dosificadora de microcapsulas EM	0.00474	100,000	0.00015	0.00021
P 108	Bomba EM inoculados	0.007424	100,000	0.00024	0.00032
P 201	Bomba de alimentación de agua residual	57.8	200,000	377.778	505.388
P 202	Bomba para evacuar lodos	0.266	200,000	0.01739	0.02326

Tabla 20. Consumo energético real bombas

<b>Equipo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Potencia bomba comercial HP</b>	<b>Consumo bomba comercial kW</b>	<b>Proveedor</b>	<b>Precio (USD)</b>
P 101-P108	Bombas lavavajillas	0.25	0.19	Pump Stop	163
P 201	Bomba para evacuar lodos	0.25	0.19	Pump Stop	163
P 202	Bomba de alimentación de agua residual	5	3.73	Pump Stop	962

A continuación, una tabla que detalla el consumo energético de los otros equipos

Tabla 21. Consumo energético equipos principales

<b>Equipo</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Fuente</b>	<b>Potencia estimada (kW)</b>
A101	0.027	Electricidad	0.02
M101	0.410	Electricidad	0.15
M102	0.005	Electricidad	0.01
M103	0.415	Electricidad	0.16
M104	0.421	Electricidad	0.17
R101	1.5	Electricidad	0.37
R201	173.44	Electricidad	4.32
ECP 101	0.047	Electricidad	0.2
		Potencia total:	5.41

## ANEXO E. LAYOUT DE LA PLANTA

Dimensiones aproximadas para cada área según las necesidades del proyecto:

### 1. Parqueaderos

Estándar por vehículo: 2.5 m × 5 m.

Se calcula 1 parqueadero por cada 5 empleados administrativos u operativos, más espacio para 2 vehículos de carga ligera que transporten el lavavajillas.

Para 15 empleados aproximadamente y 2 camiones de carga se necesitarán al menos:

$$\text{Área} = \left( \frac{15}{5} + 2 \right) \cdot 2.5 \cdot 5 \quad [27]$$

$$\text{Área} = 62.5 \text{ m}^2 \quad [28]$$

Incluyendo un espacio de circulación (50% adicional): Total de 95 m<sup>2</sup> aproximadamente.

### 2. Oficinas Administrativas

Aproximadamente 8-10 m<sup>2</sup> por persona para escritorios y equipos.

Sala de reuniones: 15-20 m<sup>2</sup>.

Área total:

$$\text{Para 2 empleados administrativos: } \text{Área} = 2 \cdot 10 = 20 \text{ m}^2 [29]$$

Incluyendo una sala de reuniones pequeña: Total de 40 m<sup>2</sup>.

### 3. Laboratorio de Control de Calidad

Los laboratorios pequeños suelen tener un área de 20-30 m<sup>2</sup>.

Distribución interna:

Espacio para equipos: 10-15 m<sup>2</sup>.

Mesa de trabajo: 6-10 m<sup>2</sup>.

Área de almacenamiento de reactivos y materiales: 4-5 m<sup>2</sup>.

Total recomendado: 30 m<sup>2</sup>, con espacio suficiente para circulación y seguridad.

Puesto que en la planta hay dos productos habrá dos áreas de control de calidad

#### **4. Zona de Almacenamiento del Lavavajillas**

La producción es de 400.74 kg/h, lo que equivale a 3,206 kg/día en jornadas de 8 horas.

Si se almacenan productos para 7 días de producción, se necesitarán espacio para 22,442 kg.

Cálculo del espacio:

Existen palets que pueden almacenar 500 kg y que ocupan un área de 1.2 m<sup>2</sup>.

$$\text{Numero de palets} = \frac{22,442}{500} \approx 45 \text{ Palets [30]}$$

$$\text{Área} = 45 \text{ Palets} \cdot 1.2 \text{ m}^2 = 54 \text{ m}^2 \text{ [31]}$$

Incluye pasillos para maniobras de montacargas (50-60% adicional): Total de 80-90 m<sup>2</sup>.

Adicionalmente se tomó en cuenta las siguientes áreas para los equipos teniendo un total de 750m<sup>2</sup> de área total.

Tabla 22. Tabla de dimensionamiento total de la planta

Área	Espacio Requerido (m <sup>2</sup> )	Descripción
<b>Áreas Principales (Equipos y Procesos)</b>		
Producción de lavavajillas	100	Incluye tanques, biorreactor R101, encapsulador, mezcladores y área de empaque.
Almacenamiento de producto terminado	90	Zona para guardar lavavajillas producido (hasta 7 días de producción).
Tratamiento de agua potable	170	Equipos y piscinas
<b>Subtotal Áreas Principales</b>	<b>360</b>	
<b>Áreas Auxiliares Compartidas</b>		
Oficinas administrativas	40	Espacio para 2 empleados, sala de reuniones, y escritorios.
Laboratorio de control de calidad	60	Para análisis fisicoquímicos y microbiológicos.
Parqueaderos	95	Espacio para empleados y maniobra de carga/descarga.
<b>Subtotal Áreas Auxiliares</b>	<b>195</b>	
<b>Espacios Adicionales y Maniobra (35% adicional)</b>	195	Pasillos, circulación, márgenes de seguridad y expansión futura.
<b>Total Planta Integrada</b>	<b>720-750</b>	Considerando áreas optimizadas para ambas funciones.

De esta manera se obtiene el siguiente layout donde se observa que la mayor cantidad de espacio será ocupada por la planta de tratamiento y potabilización de agua.

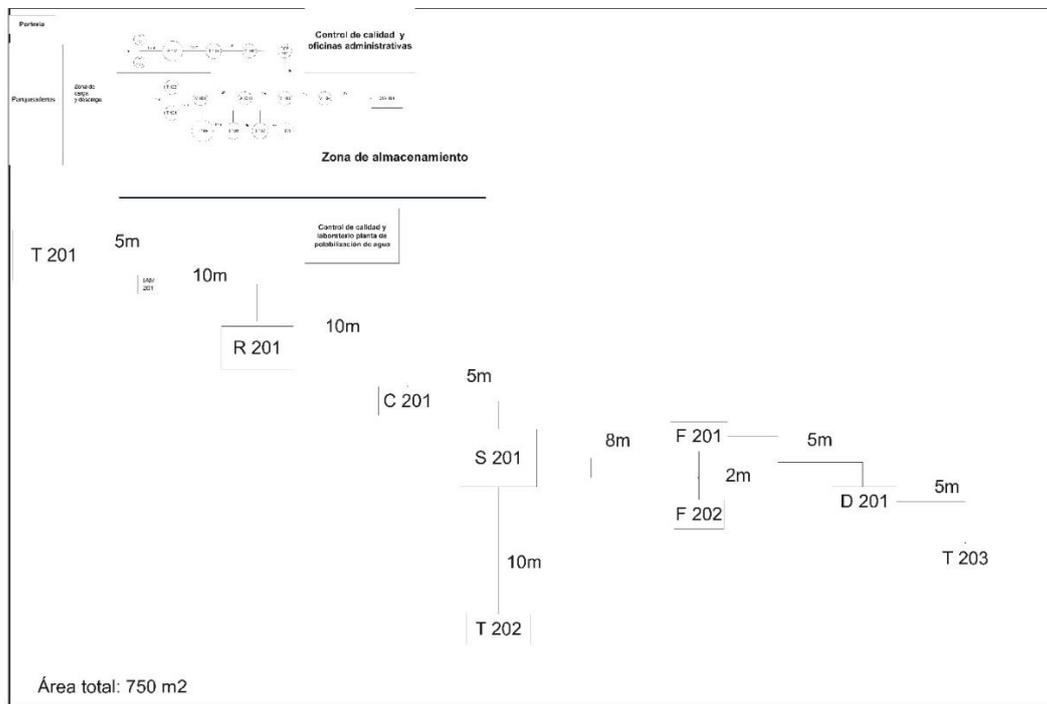


Figura 17. Layout de la planta dual.

## **ANEXO F. ANÁLISIS DE SEGURIDAD**

La metodología HAZOP fue aplicada en nodos críticos de cada proceso teniendo en cuenta diferentes parámetros y posibles desviaciones. A continuación se observan las tablas correspondientes a cada análisis al igual que el análisis PI&D detallado de cada equipo

### **5.1 Producción de lavavajillas**

Tabla 23. Análisis HAZOP para tanque de melaza y agua

<b>Equipo</b>	<b>T101 - Tanque de Melaza y Agua</b>		
<b>Parámetro</b>	Caudal	Caudal	Nivel
<b>Palabra guía</b>	No	Más	Más
<b>Desviación</b>	No flujo de melaza y agua	Exceso de flujo en la entrada	Nivel excesivo en tanque
<b>Causa</b>	Obstrucción de tuberías, falla de la bomba	Falla en válvulas de control, bomba de dosificación desajustada	Error en el control de llenado, retraso en la señal de parada de la bomba
<b>Riesgo potencial</b>	Parada de alimentación, fallo de producción	Derrames, riesgo de sobrellenado	Derrame o contaminación
<b>Mitigación humana</b>	Revisar niveles en tanque	Supervisión durante operación	Verificación visual del nivel
<b>Mitigación de control automático</b>	Sensor de caudal con alarma de fallo	Válvula de control de caudal automática	Sensor de nivel con alarma
<b>Mantenimiento</b>	Inspección regular de válvulas	Verificación de bombas y válvulas	Limpieza del tanque y revisión de sensores

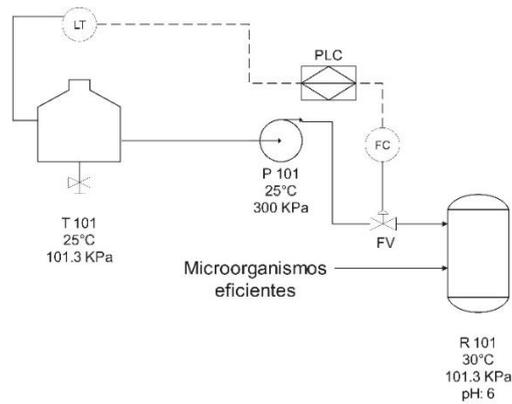


Figura 18. Diagrama PI&D para tanque de melaza y agua

El diagrama PI&D describe el funcionamiento del Tanque de Almacenamiento de Melaza y Agua (T101), el cual recibe agua y melaza como entradas y envía una mezcla hacia el bioreactor como salida. Para el monitoreo del nivel de líquido en el tanque, se incorporan sensores de nivel alto, bajo y medio (LT - Level Transmitter). Además, se incluye un Controlador de Caudal (FC - Flow Controller) que regula el caudal hacia el biorreactor, acompañado de una válvula de control automática (FV - Flow Control Valve) para asegurar un flujo constante. Para evitar riesgos de sobrepresión, se instala una válvula de alivio de presión, y todo el sistema está conectado mediante líneas eléctricas y señales a la unidad de control central (PLC).

Tabla 24. Análisis de riesgo HAZOP Biorreactor de cultivo EM

<b>Equipo</b>	<b>R101 - Biorreactor de Cultivo</b>		
<b>Parámetro</b>	Temperatura	Composición	Oxigenación
<b>Palabra guía</b>	Más	Menos cualitativo	No
<b>Desviación</b>	Aumento de temperatura	Baja concentración de EM	Sin suministro de oxígeno
<b>Causa</b>	Fallo en el sistema de enfriamiento, calor exógeno de reacciones	Error en la dosificación, agotamiento del sustrato	Fallo en sistema de aireación, bloqueo de difusores
<b>Riesgo potencial</b>	Degradación de EM, baja eficiencia	Reducción en la eficiencia del producto final	Falta de crecimiento bacteriano
<b>Mitigación humana</b>	Monitoreo de temperatura	Medición de EM previo al proceso	Inspección visual de burbujeo
<b>Mitigación de control automático</b>	Controlador de temperatura	Sensor de concentración	Alarma de oxígeno disuelto
<b>Mantenimiento</b>	Verificación del sistema de enfriamiento	Inspección de dosificación de EM	Mantenimiento de difusores

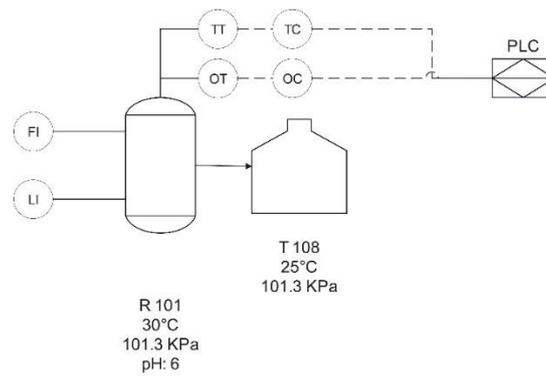


Figura 19. Diagrama PI&D biorreactor de EM

El diagrama PI&D del biorreactor de cultivo (R101) incluye diversos componentes clave para asegurar el funcionamiento óptimo del proceso. El sistema cuenta con un sensor de temperatura (TT - Temperature Transmitter) para monitorear la temperatura interna, y un controlador de temperatura (TC - Temperature Controller) que regula el sistema de enfriamiento o calefacción automático en caso de que la temperatura se desvíe de los límites operacionales. Además, se incorpora un sensor de oxígeno disuelto (OT - Oxygen Transmitter) para garantizar la aireación adecuada, con un controlador de oxígeno (OC - Oxygen Controller). Un agitador controlado, con motor y opciones de ajuste de velocidad, mantiene la homogeneidad del cultivo. El biorreactor también está equipado con una válvula de descarga y alivio de presión para controlar el flujo de salida y aliviar la presión en situaciones de emergencia. Por último, se incluyen indicadores de nivel y caudal para monitorear la salida de microorganismos hacia el encapsulador, garantizando un flujo constante y controlado. Todos estos componentes están conectados al PLC, lo que permite un monitoreo y control centralizado del biorreactor, asegurando su funcionamiento eficiente y seguro.

Tabla 25. Análisis de riesgo HAZOP encapsulador EM

Equipo	ECP101 - Encapsulador	
Parámetro	Caudal	Caudal
Palabra guía	Menos	Otro
Desviación	Menor flujo de EM	Mezcla incorrecta de encapsulante
Causa	Obstrucción en tuberías, bomba desajustada	Error en proporciones de alginato y EM, fallo de sensor de mezcla
Riesgo potencial	Deficiencia en encapsulación	Encapsulación inconsistente
Mitigación humana	Ajuste manual de flujo	Supervisar calidad en línea
Mitigación de control automático	Regulador de caudal	Verificación de viscosidad de la mezcla
Mantenimiento	Mantenimiento de la bomba	Limpieza regular de boquillas

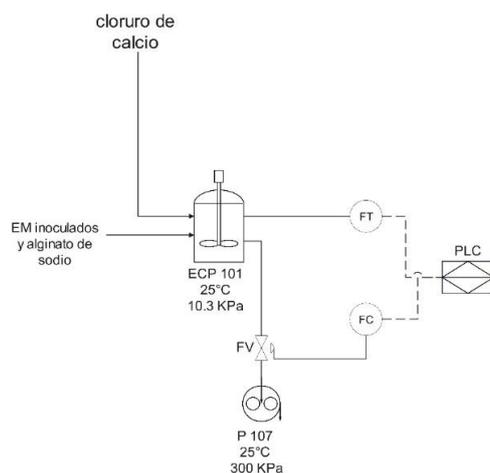


Figura 20. Diagrama PI&amp;D encapsulador de EM.

El diagrama PI&D del sistema de dosificación incluye un medidor de Caudal (FT - Flow Transmitter) para asegurar la correcta dosificación de EM y alginato, y un controlador de

caudal (FC) que, en conjunto con válvulas de control de flujo (FV), permite ajustar la dosificación de manera precisa. Estos componentes están conectados al PLC, lo que permite un monitoreo y control centralizado de la dosificación, asegurando que los flujos se mantengan dentro de los parámetros operativos óptimos y garantizando la consistencia del proceso.

## 5.2 Potabilización de agua

Tabla 26. Análisis HAZOP tamiz

<b>Equipo</b>	<b>TAM201 - Tamiz</b>	
<b>Parámetro</b>	Caudal	Caudal
<b>Palabra guía</b>	No	Más
<b>Desviación</b>	No flujo de agua residual	Caudal excesivo
<b>Causa</b>	Obstrucción por sólidos, bomba de alimentación defectuosa	Falla en la válvula de control, sobrecarga de bomba
<b>Riesgo potencial</b>	Parada en la línea de tratamiento	Saturación o rotura del tamiz
<b>Mitigación humana</b>	Monitoreo en entrada de agua residual	Supervisión constante
<b>Mitigación de control automático</b>	Sensor de caudal y alarma de fallo	Alarma de caudal en la entrada
<b>Mantenimiento</b>	Limpieza de tamiz y eliminación de obstrucciones	Revisión de estructura del tamiz

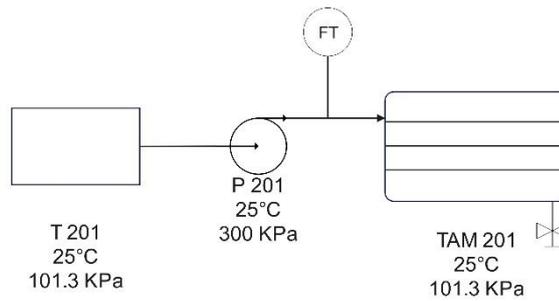


Figura 21. Diagrama PI&D tamiz

El diagrama PI&D del sistema de tratamiento de agua residual incluye un sensor de caudal en entrada (FT) para monitorear el flujo de entrada de agua residual. Para garantizar un funcionamiento eficiente y evitar la colmatación, se recomienda implementar un controlador de limpieza automática, que permitirá mantener el sistema libre de residuos. El sistema también cuenta con válvulas de purga y descarga de sólidos para eliminar residuos y asegurar la limpieza del equipo. Todas estas funciones están integradas en el PLC permitiendo un monitoreo y control centralizado para gestionar el proceso de limpieza de manera efectiva y prevenir fallos operativos.

Tabla 27. Análisis HAZOP tanque de aireación

<b>Equipo</b>	<b>R201 - Reactor Biológico tanque de aireación</b>	
<b>Parámetro</b>	Oxigenación	Temperatura
<b>Palabra guía</b>	Menos	Más
<b>Desviación</b>	Baja aireación en el tanque	Temperatura elevada
<b>Causa</b>	Baja presión en el sistema de aire, obstrucción de difusores	Fallo en el sistema de refrigeración, condiciones ambientales
<b>Riesgo potencial</b>	Ineficiencia en degradación de contaminantes	Dstrucción de bacterias
<b>Mitigación humana</b>	Supervisar visualmente la aireación	Control de temperatura en línea
<b>Mitigación de control automático</b>	Sensor de oxígeno disuelto	Regulador de temperatura con alarma
<b>Mantenimiento</b>	Limpieza y verificación de difusores	Revisión del sistema de refrigeración

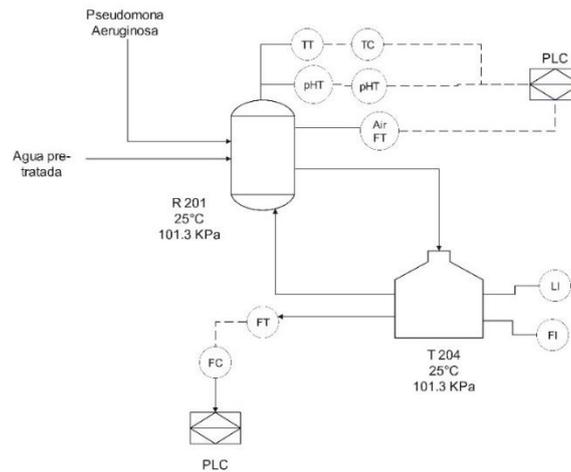


Figura 22. Diagrama PI&D tanque de aireación

El diagrama PI&D del Reactor Biológico (R201) incluye varios componentes clave para garantizar un proceso eficiente. Se incorporan sensores de temperatura y pH (TT y pHT) para monitorear la temperatura. Además, el sistema de Recirculación de Lodos Activados, con control automático, mantiene la concentración de sólidos deseada al tanque de aireación mediante un sensor de caudal y un controlador. Todos estos componentes están conectados al PLC, lo que permite el monitoreo y control centralizado del reactor, asegurando que todas las variables se mantengan dentro de los parámetros adecuados y garantizando un funcionamiento eficiente y seguro.

Tabla 28. Análisis HAZOP coagulador/floculador

Equipo	C201 - Coagulador/Floculador	
Parámetro	Caudal	Caudal
Palabra guía	Menos	Más
Desviación	Baja dosificación de coagulante	Exceso de coagulante
Causa	Obstrucción en dosificador, agotamiento de coagulante	Error de calibración en la dosificación
Riesgo potencial	Deficiencia en la formación de flóculos	Producción de flóculos no deseados
Mitigación humana	Supervisar calidad de flóculos	Ajuste de dosis manual
Mitigación de control automático	Dosificador automático	Dosificador controlado por sensor
Mantenimiento	Limpieza y calibración de la bomba	Revisión periódica de calibración

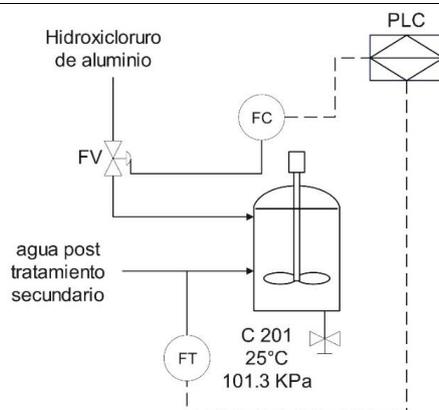


Figura 23. Diagrama PI&amp;D coagulador

El diagrama PI&D del Coagulador/Floculador (C201) incluye varios componentes esenciales para un proceso de tratamiento de agua eficiente. Se instala un sensor de caudal de entrada (FT) para ajustar la dosis de coagulante en función del caudal de agua. Un mezclador automático con control de velocidad ajustable se utiliza para optimizar la mezcla según la necesidad y el tamaño de los flóculos. También se incorpora una válvula de alivio de presión para prevenir problemas en caso de obstrucción.

Tabla 29. Análisis HAZOP filtros de arena

<b>Equipo</b>	<b>F201/F202 - Filtros de Arena</b>	
<b>Parámetro</b>	Presión	Composición
<b>Palabra guía</b>	Más	Más cualitativo
<b>Desviación</b>	Alta presión en el filtro	Alta concentración de partículas
<b>Causa</b>	Saturación del filtro, exceso de caudal de entrada	Sobrecarga de sólidos en el flujo de entrada
<b>Riesgo potencial</b>	Daño estructural del filtro	Obstrucción y baja eficiencia de filtrado
<b>Mitigación humana</b>	Supervisar presión en línea	Monitoreo de salida de filtro
<b>Mitigación de control automático</b>	Sensor de presión con alarma	Alarma de calidad de salida
<b>Mantenimiento</b>	Cambio de arena y limpieza	Reemplazo de medios filtrantes

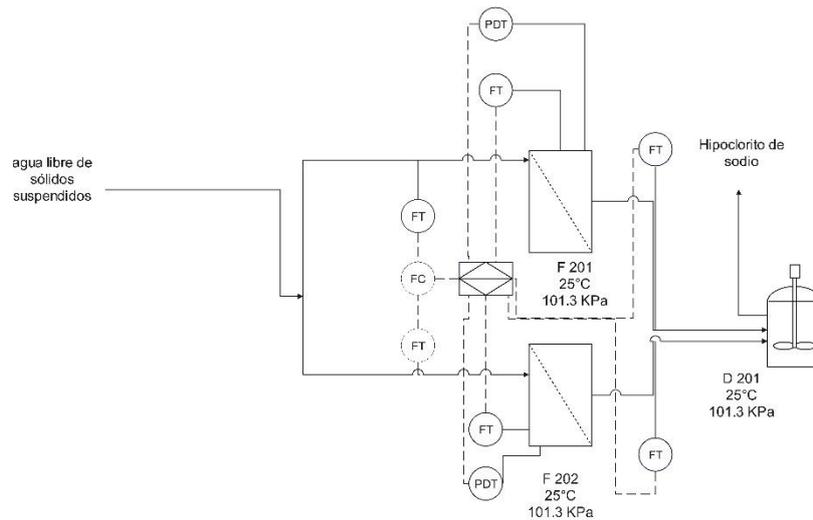


Figura 24. Diagrama PI&D filtros de arena

El diagrama PI&D de los Filtros de Arena (F201 y F202) incluye componentes clave para asegurar el funcionamiento adecuado del proceso de filtración. Se incorporan medidores de caudal en entrada y salida (FT) para asegurar que el flujo de agua esté dentro del rango operativo y garantizar una filtración eficiente. Estos sistemas están conectados al PLC, lo que permite el monitoreo y control centralizado.

Tabla 30. Análisis HAZOP zona de desinfección

<b>Equipo</b>	<b>D201 - Unidad de Desinfección</b>
<b>Parámetro</b>	Composición
<b>Palabra guía</b>	Menos cualitativo
<b>Desviación</b>	Baja dosificación de hipoclorito
<b>Causa</b>	Fallo en la bomba dosificadora, agotamiento de hipoclorito
<b>Riesgo potencial</b>	Agua insuficientemente desinfectada
<b>Mitigación humana</b>	Inspección de dosis de hipoclorito
<b>Mitigación de control automático</b>	Alarma de dosificación y sensor de cloro
<b>Mantenimiento</b>	Calibración y revisión del sistema de dosificación

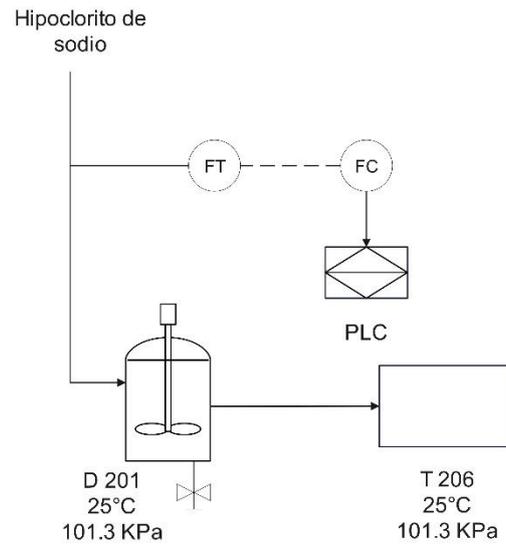


Figura 25. Diagrama PI&D tanque de desinfección

El diagrama PI&D del sistema de dosificación de Hipoclorito incluye un sensor de caudal de hipoclorito (FT) para controlar la dosificación precisa de cloro, asegurando que se mantenga dentro de los niveles adecuados para el proceso. Además, se incorpora una válvula de alivio de presión y descarga, que permite evitar la sobrepresión en el sistema y facilita la purga en caso de emergencia.

## **ANEXO G. ANÁLISIS ECONÓMICO**

### **1. Capital de inversión**

Se realizó la suma de la maquinaria principal obteniendo un valor total de 123,345.79\$.

Adicionalmente se tomaron en cuenta los costos del laboratorio de control de calidad como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 31. Costos de los equipos de control de calidad

<b>Equipo</b>	<b>Costo Promedio (USD)</b>	<b>Cantidad Necesaria</b>	<b>Proveedor</b>
pH-metro	375	1	SCHARLAB, AQUAINTEGRAL
Turbidímetro	700	1	SCHARLAB, AQUAINTEGRAL
Conductímetro	500	1	BERNARDO LABS, AQUAINTEGRAL
Espectrofotómetro UV-Vis	5,750	1	BERNARDO LABS, LAB EQUIPMENT SALES
Kit de análisis microbiológico (incubadora)	1,500	1	BERNARDO LABS, FISHER SCIENTIFIC
Equipo para medir cloro residual	425	1	AQUAINTEGRAL
Balanzas analíticas	950	1	SCHARLAB
Filtrador de vacío	225	1	AQUAINTEGRAL
Autoclave	3,500	1	FISHER SCIENTIFIC, LAB EQUIPMENT SALES
Consumibles (pipetas, vasos, matraces)	750	Varios (estimado 10-20)	AQUAINTEGRAL, LAB EQUIPMENT SALES

Teniendo un costo total de equipos de laboratorio de 14,675\$, **el total el costo de los equipos es de 138,020,79\$.**

Factor de Lang:

El factor de Lang según Sinnot 2008 para mixtos es de 4, por lo tanto, el costo fijo total según el factor de Lang es de

$$\text{Costo} = 4 \cdot 138,020.79 = 552,083.16 \text{ USD [32]}$$

Factor de Hand:

Tabla 32. Costos según el factor de Hand

<b>Equipos</b>	<b>Costo</b>	<b>Factor de Hand</b>	<b>Costo total</b>
Tanques de almacenamiento	14641,38	2.5	36.603,45
Piscinas de almacenamiento	20800	2.5	52,000
Tanques de mezclado	1348,55	2.5	3,713.75
Otros equipos	8335,75	2.5	20,839.375
Biorreactores	22625	5	113,125
Bombas	2429	4	9,716
		<b>Costo total</b>	<b>235,655.20</b>

Factorial detallado:

Tabla 33. Tabla de los costos fijos método factorial detallado

<b>Concepto</b>	<b>Porcentaje (%) del costo de equipos</b>	<b>Costo (USD)</b>
Costo de equipos principales		138,020.79
Tuberías	35%	48,307.28
Instrumentación	20%	27,604.16
Instalación eléctrica	15%	20,703.12
Estructuras	10%	13,802.08
Pintura y aislamiento	8%	11,041.66
Transporte y logística	12%	16,562.49
Costo total		276,041.58

A partir del método de Hand y factorial detallado con un margen  $\pm 30\%$  cada uno se realizó el cálculo del ISBL promedio de la siguiente forma:

Tabla 34. Cálculo del ISBL promedio

<b>Método</b>	<b>Valor total</b>	<b>Margen 30%</b>	<b>-30%</b>	<b>+30%</b>
HAND	235,655.20	70,696.56	164,958.64	306,351.76
DETALLA				
DO	276,041.58	82,812.47	193,229.11	358,854.05
			<b>ISBL PROMEDIO</b>	<b>Promedio de: - 30%Hand+(+30%detallado)</b>
			<b>ISBL PROMEDIO</b>	<b>261,906.35</b>

A partir del ISBL, se calculan los otros factores de capital fijo como OSBL, costos de ingeniería, gastos de imprevistos, entre otros.

Tabla 36. Resumen de los costos fijos de la planta

<b>Concepto</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Valor (USD)</b>
Costo equipos	-	138,020.79
ISBL	Promedio método Hand y detallado	261,906.35
OSBL	$0.4 * ISBL$	104,762.54
Ingeniería y Construcción	$0.15 * ISBL$	39,285.95
Imprevistos	$(0.1) (1.4 * ISBL)$	36,666.89
Terreno	Costo del terreno de la PTAR anterior	571,000
<b>Total Inversión de Capital Fijo</b>	Suma Total	<b>656,857.03</b>

## 2. Capital de trabajo

### Costos materia prima:

La materia prima se costeó en función de un kilogramo de lavavajillas y un metro cúbico de agua potable tratada, todos del mismo proveedor en Colombia SC químicos, de la siguiente manera:

Tabla 37. Costo materia prima producción del lavavajillas

Componente	Concentración (%)	Costo por gramo de materia prima pura (USD)	Costo para un kilogramo de lavavajillas (USD)
Betaína de coco	8	0,005	0,4
Alquil poliglucósido (APG)	8	0,01084	0,8672
Alfa olefín sulfonato de sodio (AOS)	15	0,003	0,45
Glicerina Vegetal	5	0,0069	0,345
Carboximetilcelulosa (CMC)	1,5	0,01	0,15
Benzoato de sodio	0,5	0,00325	0,01625
Sorbato de potasio	0,5	0,0104	0,052
Ácido cítrico	0,2	0,0058	0,0116
EDTA	0,3	0,00475	0,01425
EM (encapsulados)	1	0,1	1
Aroma natural	1	0,025	0,25
Agua destilada	59	0,0006	0,354
	100	<b>PRECIO TOTAL 1 KG DE LAVAVAJILLA</b>	<b>3,9103</b>

Teniendo en cuenta que se producirán 1,090,000 kg/año el costo anual de materia prima es de 4,262,227\$.

Por otro lado obtenemos el costo de la materia prima de la potabilización de agua de la siguiente manera:

Tabla 38. Costo materia prima potabilización de agua

<b>Componente</b>	<b>Costo por gramo</b>	<b>Costo para metro cúbico de agua tratada (USD)</b>
Hidroxiclورو de aluminio	0,003	0,009
Hipoclorito de sodio	0,00345	0,0030015

Adicionalmente se toma en cuenta que el costo anual de Pseudomonas aeruginosa será de 95.76 \$/año ya que se deben añadir cíclicamente cada 3 mese 0.57 kg de pseudomona que tiene un costo de 0.042 \$/g para que no baje el rendimiento del biorreactor. Y que el lavavajillas será envasado en envases PET de 500 ml que tienen un costo de 1.25\$ la unidad es decir en total para la producción anual: 681,250\$El costo total de las materias primas es de **6,458,947.76\$/año.**

#### Costos energía:

El costo de energía en colombia es de 0.21 \$/kWh, a partir de eso se calcula el costo total de energía como:

$$\text{Costo energía} = 25,894.4 \text{ kWh} \cdot 0.21 = 5437.82 \text{ USD [33]}$$

#### Costos salario:

Teniendo en cuenta que el salario mínimo en Colombia es de 220\$ los salarios se dividirán de la siguiente manera.

- Operarios (70%): Reciben 1.5 veces el salario mínimo, es decir, 330 USD/mes. En este caso, hay 7 operarios para la planta de lavavajillas y 30 para la planta de tratamiento de agua, 10 en cada turno
- Técnicos especializados (20%): Reciben 2.5 veces el salario mínimo, es decir, 550 USD/mes. En este caso, hay 2 técnicos en la planta de lavavajillas y 9 para la planta de tratamiento de agua, 3 en cada turno.
- Supervisores (10%): Reciben 3.5 veces el salario mínimo, es decir, 770 USD/mes. En este caso, hay 1 supervisor para la planta de lavavajillas y 3 para la planta de tratamiento de agua, es decir 1 en cada turno.

De esta manera obtenemos los siguientes costos:

Tabla 39. Costo del personal anual

Planta	Operarios	Técnicos especializados	Supervisores	Costo total mensual (USD)	Costo total anual (USD)
Planta de Lavavajillas	7 * 330 = 2,310 USD	2 * 550 = 1,100 USD	1 * 770 = 770 USD	4,180 USD	50,160 USD
Planta de Agua Potable	33 * 330 = 10,890 USD	9 * 550 = 4,950 USD	3 * 770 = 2,310 USD	18,150 USD	217,800 USD

El costo total del personal anual es de **267,960 \$/año.**

### Costos de mantenimiento:

Se tiene en cuenta un 5% del capital fijo como costos de mantenimiento, es decir:

**13,095.32\$.**

Por lo tanto, en total tenemos egresos variables por la suma de 6,458,945.36\$ y de egresos fijos por la suma de 286,493,32, teniendo **egresos anuales totales de 6,745,438.68\$**

### **3. Estimación de ingresos.**

Actualmente en Colombia el m<sup>3</sup> de agua tiene un costo de 0.020 \$, mientras que el kilogramo de lavavajillas biodegradables ya existentes en el mercado está alrededor de los 5\$ y 7.50\$. En este caso para que nuestro producto sea competitivo tendrá un costo de 6.60\$ que cumple con el rango de precios y que además cumple con una ganancia de más del 30%. Por lo tanto, los ingresos anuales obtenidos de la planta son los siguientes:

Tabla 40. Estimación de ingresos anuales

<b>Producto</b>	<b>Cantidad anual</b>	<b>Precio de venta</b>	<b>Ingreso anual (USD)</b>
Agua potable	505,125 m <sup>3</sup>	0.020 USD/m <sup>3</sup>	10.102,5
Lavavajillas	1,090,000 kg	6.6 USD/kg	7,194,000.00
<b>Ingreso total anual</b>			<b>7,204,102.5</b>

### **4. Análisis de rentabilidad.**

A partir de todos los análisis realizados anteriormente obtenemos la siguiente tabla resumen de costos:

Tabla 41. Resumen de todos los costos de la planta dual

Costos	Fórmula	Valor
Ce	$\Sigma ce_i$	\$138.020,79
ISBL	Mé. Fac. Det.	\$261.906,35
OSBL	$0.4 C_{ISBL}$	\$104.762,54
Ingeniería y Construcción	$0.15 C_{ISBL}$	\$39.285,95
Imprevistos	$(0.1)(1.4 C_{ISBL})$	\$36.666,89
Inversión de Capital Fijo	$1.59 C_{ISBL}$	\$416.431,10
Producción Variable (VCOP)	$C_{\text{materias primas}} + \text{otros}$	\$6.458.937,76
Producción Fijo (CSOP)	$\Sigma \text{sueldos Trabajadores} + \text{otros}$	\$273.397,82
Supervisión	$0.25 C_{SOP}$	\$68.349,46
Salud y Seguro	$0.25 (0.4 C_{SOP})$	\$27.339,78
Mantenimiento	$0.05 C_{ISBL}$	\$13.095,32
Impuestos y permisos	$0.01 C_{ISBL}$	\$2.619,06
Alquiler de Tierra	$0.01 (C_{ISBL} + C_{OSBL})$	\$3.666,69
Gastos generales	$[(0.65)(1.25 C_{SOP})] + [0.03 C_{ISBL}]$	\$229.992,92
Medio Ambiente	$(0.1)(1.4 C_{ISBL})$	\$36.666,89
Producción Total (CCOP)	$VCOP + [2.56 C_{SOP} + 0.1 C_{ISBL}]$	\$7.185.026,81
Capital de Trabajo (CMP)	$C_{MP}$ de 2 semanas	\$774.479,45
Inventario Productos y Subproductos	$C_{COP}$ de 2 semanas	\$248.420,68
Efectivo en Caja	$C_{COP}$ de 1 semana	\$138.173,59
Cuentas por Cobrar	$C_{COP}$ de 4 semana	\$552.694,37
Créditos pendientes	$1.1 C_{MP}$ de 4 semanas	\$1.703.854,79
Inventario Repuestos (IR)	$(0.01)(1.4 C_{ISBL})$	\$3.666,69
Capital de Trabajo Total	$(C_{MP} 6 \text{ semanas}) + (C_{COP} 6 \text{ semanas}) + IR$	\$3.072.367,08
<b>TOTAL</b>		<b>\$21.789.822,78</b>

Ahora, asumiento que el capital de inversión de 987,642.52 será 100% un préstamo y la tasa de descuento en Colombia es de 9,75% y que el tiempo de vida útil del proyecto será de 10 años, los pagos anuales de la deuda con un interés compuesto se harán de la siguiente manera:

Tabla 42. Tabla de pagos anuales

	<b>Saldo Inicial (USD)</b>	<b>Interés (USD)</b>	<b>Amortización (USD)</b>	<b>Pago Anual (USD)</b>
1	656,857.03	64,534.56	42,193.07	106,727.63
2	614,663.96	59,929.73	46,797.90	106,727.63
3	567,866.06	55,348.93	51,378.70	106,727.63
4	516,487.37	50,856.52	55,871.11	106,727.63
5	460,616.26	45,671.96	61,055.67	106,727.63
6	399,560.59	38,894.65	67,832.98	106,727.63
7	331,727.61	32,364.94	74,362.69	106,727.63
8	257,364.92	25,097.58	81,630.05	106,727.63
9	175,734.87	17,129.65	89,598.00	106,727.63
10	86,136.87	8,394.34	98,333.29	106,727.63

A continuación, se calculan los ingresos brutos de la siguiente manera:

$$\text{Beneficio Bruto} = \text{Ingresos} - \text{Egresos} [34]$$

$$\text{Beneficio Bruto} = 7,204,102.5 - 6,745,438.68 [35]$$

$$\text{Beneficio bruto} = 458,663.82\$ [36]$$

Para el beneficio neto se restan los impuestos del 19% y el pago anual del préstamo:

$$\text{Beneficio neto} = 458,663.82 - 87,146.12 - 106,727.63 [37]$$

$$\text{Beneficio neto} = 264,793.1\$ [38]$$

A partir del beneficio neto obtenemos el flujo de caja de la siguiente manera:

Tabla 43. Flujo de caja

<b>Año</b>	<b>Ingresos</b>	<b>Egresos</b>	<b>Amortización deuda</b>	<b>Impuesto</b>	<b>Flujo de caja neto</b>	<b>Flujo de caja acumulado</b>
-	-	-962,873.17	-	-	-962,873.17	-962.873,17
1	7,204,102.50	6,745,438.68	106.727,63	87,146.12	264.790,07	-698.083,10
2	7,204,102.50	6,745,438.68	106.727,63	87,146.12	264.790,07	-433.293,03
3	7,204,102.50	6,745,438.68	106.727,63	87,146.12	264.790,07	-168.502,96
4	7,204,102.50	6,745,438.68	106.727,63	87,146.12	264.790,07	96.287,11
5	7,204,102.50	6,745,438.68	106.727,63	87,146.12	264.790,07	361.077,18
6	7,204,102.50	6,745,438.68	106.727,63	87,146.12	264.790,07	625.867,25
7	7,204,102.50	6,745,438.68	106.727,63	87,146.12	264.790,07	890.657,32
8	7,204,102.50	6,745,438.68	106.727,63	87,146.12	264.790,07	1.155.447,39
9	7,204,102.50	6,745,438.68	106.727,63	87,146.12	264.790,07	1.420.237,46
10	7,204,102.50	6,745,438.68	106.727,63	87,146.12	264.790,07	1.685.027,53

A partir de esta graficamos la evolución del saldo en función del tiempo:

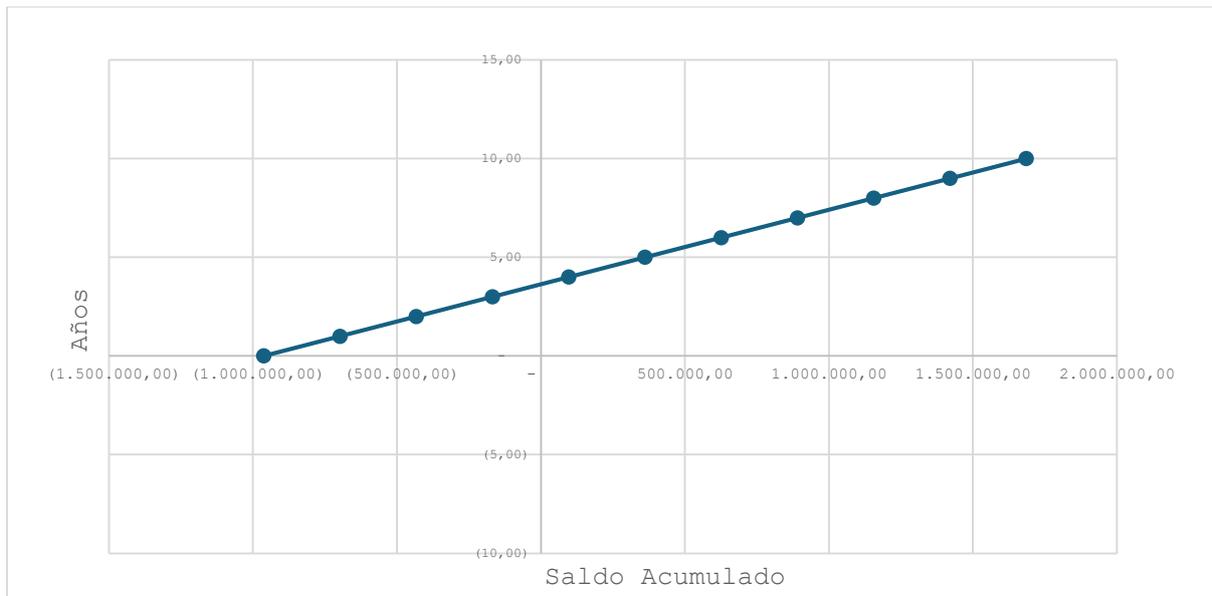


Figura 26. Evolución del saldo en función del tiempo

Finalmente, calculamos el VAN, la tasa interna de retorno y el tiempo de recuperación de la siguiente forma:

$$VAN = FCL \cdot \left( \frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r} \right) - I \quad [39]$$

En donde VAN es el valor actual neto que es el beneficio neto de un proyecto después de descontar el valor del dinero en el tiempo, es decir, ajustando por la tasa de descuento o el costo de oportunidad del capital, FCL el flujo de caja disponible,  $r$  la tasa de descuento de 9.75%,  $n$  el número de años del proyecto (10 años) e  $I$  la inversión inicial (416,431.10\$).

$$VAN = 264,790.07 \cdot \left( \frac{1 - (1 + 0.0975)^{-10}}{0.0975} \right) - 656,857.03 \quad [41]$$

$$VAN = 990,067.78 \quad [41]$$

Para calcular la tasa interna de retorno utilizamos la siguiente ecuación:

$$TIR = \frac{FCL}{I} \cdot 100\% \quad [42]$$

$$TIR = \frac{264,790.07}{656,857.03} \cdot 100\% [43]$$

$$TIR = 40.3\% [44]$$

Para el tiempo de recuperación observamos la tabla de flujo de caja en donde el valor se vuelve positivo a los 4 años,

### ANEXO H. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para obtener el precio de venta del lavavajillas se realizó un análisis de sensibilidad en el que se varió el precio de venta desde obtener un 30% de ganancia hasta ver un periodo de retorno de inversión de 5 años o menos que es lo ideal para un proyecto que requiere estructura. A continuación, se muestra la tabla con los resultados.

Tabla 44. Análisis de sensibilidad del precio de venta del lavavajillas

<b>Costo por kg lavavajillas (USD)</b>	<b>% de ganancia</b>	<b>Ingresos netos (USD)</b>	<b>Tiempo de recuperación (años)</b>
5,083	30%	5.540.470,00	NO
5,474	40%	5.966.660,00	NO
5,865	50%	6.392.850,00	NO
6,256	60%	6.819.040,00	NO
6,4515	65%	7.032.135,00	8
6,4906	66%	7.074.754,00	7
6,5297	67%	7.117.373,00	5
6,6	68%	7.194.000,00	4
6,647	70%	7.245.230,00	4
6,7252	72%	7.330.468,00	3

A partir de esta tabla se puede demostrar la variabilidad de los precios, esto demuestra como con tan solo un 2% más de ganancia el tiempo de recuperación de la inversión puede disminuir drásticamente a casi la mitad entre una ganancia del 66% y del 67%. Este precio es solamente posible si se vende el 100% de la producción por lo que se procedió a hacer un análisis de sensibilidad cruzado para poder analizar qué precio de venta puede ser aceptable según el porcentaje de venta más realístico posible:

Tabla 45. Análisis de sensibilidad de precio vs demanda de lavavajillas y de tiempo de retorno

<b>Precio venta/ Demanda</b>	100%	95%	90%	85%	80%	75%
<b>6,60</b>	4	NO	NO	NO	NO	NO
<b>6,65</b>	4	NO	NO	NO	NO	NO
<b>6,72</b>	3	NO	NO	NO	NO	NO
<b>6,84</b>	3	6	NO	NO	NO	NO
<b>7,04</b>	2	<b>3</b>	NO	NO	NO	NO
<b>7,43</b>	1	2	<b>3</b>	NO	NO	NO
<b>7,82</b>	1	1	2	<b>4</b>	NO	NO
<b>8,21</b>	1	1	2	2	5	NO
<b>8,60</b>	1	1	1	2	2	8

Es decir que para poder seguir siendo atractivo para los inversionistas y no tener el 100% de la producción vendida se deberá vender al menos el 95% de la producción en 7\$, el 90% en 7.43\$ o el 85% en 7.82\$