



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



Rediseño de planta de Biodiesel en la Municipalidad de Hualpén

POR

Miguel Ángel Urzúa Venegas

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

Profesora Guía:
Dra. Einara Blanco Machin.

Enero 2024
Concepción (Chile)

© 2023 Miguel Ángel Urzúa Venegas

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Resumen:

La problemática actual de la incorrecta eliminación de residuos es una preocupación a nivel mundial y nacional. En particular, el manejo inadecuado del aceite de cocina ha generado un importante impacto ambiental en el agua, el suelo, y la salud humana y silvestre. En este contexto, la Municipalidad de Hualpén busca reactivar su planta de producción de Biodiesel para transformar el aceite de cocina usado en un combustible mediante la transesterificación, reduciendo así el impacto ambiental asociado a su desecho y promoviendo el uso de este biocombustible como alternativa al combustible convencional. En este estudio se evaluó y rediseñó la planta de producción de biodiesel con el objetivo de optimizar su funcionamiento. Se identificaron los equipos dañados, se propuso su sustitución y eliminación, y se diseñó una distribución adecuada, determinando el tamaño de los equipos según las necesidades municipales, que incluyen una producción mensual de 200 litros. Se estima que la inversión inicial requerida para iniciar el proyecto es de \$4.261.370. Sin embargo, el análisis económico realizado a lo largo de 7 años reveló la inviabilidad del proyecto en las condiciones actuales, resaltando la necesidad de mejorar la productividad de la planta para aprovechar al máximo su capacidad total de 11400 litros mensuales.

Palabras clave: Biodiesel, rediseño, transesterificación, aceite de cocina usado.

Abstract

The current situation of improper waste disposal is a concern both globally and nationally. The specific case of cooking oil has become a significant environmental problem due to its impact on water, soil, and human and wildlife health. In this context, the Municipality of Hualpén aims to reactivate its Biodiesel production plant to repurpose used oil into fuel through transesterification, reducing the environmental impact associated with its disposal and using the produced fuel as a substitute for traditional fuel. This study evaluated and redesigned the biodiesel production plant to optimize its operation. Damaged equipment was identified for replacement or elimination, and a layout was designed based on the Municipality's needs, including a monthly production volume of 200 liters. The initial investment required for the project's start is estimated at \$4,261,370. However, an economic analysis over a 7-year horizon revealed the project's infeasibility under current conditions, emphasizing the importance of enhancing plant productivity to fully utilize its 430-liter capacity.

Keywords: Biodiesel, redesign, transesterification, waste cooking oil.

Índice de contenido

Resumen:.....	ii
Abstract	iii
Capítulo 1. Introducción.	1
1.1 Presentación del problema.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Metodología de trabajo.....	2
Capítulo 2. Marco teórico.	4
2.1 Definición y clasificación de los combustibles.	4
2.2 Clasificación de los biocombustibles. [3].....	4
2.3 ¿Qué es el Biodiesel?.....	5
2.4 Métodos de obtención del Biodiesel. [4].....	5
Capítulo 3. Análisis general de la planta.....	7
3.1 Descripción de los equipos de planta de Biodiesel.....	7
3.2 Funcionamiento actual de la planta de Biodiesel.	7
3.3 Descripción del proceso de elaboración:	7
3.4 Resultados de las inspecciones.	11
Capítulo 4. Planteamiento del rediseño.....	18
4.1 Sectorización	18
4.2 Dimensionamiento de equipos y accesorios.....	22
Capítulo 5. Análisis económico de la propuesta.	31
5.1 Inversión inicial.	31
5.2 Estimación del valor del Biodiesel.	32
5.3 Consumos eléctricos.	32
5.4 Bombas:	33
5.5 Equipos de producción:	33
5.6 Gastos operacionales:	34
5.7 Flujo de caja.....	35
Capítulo 6. Conclusiones.	37

Índice de figuras

Figura 2.1: Diagrama de clasificación biocombustibles.	5
Figura 2.2: Reacción química estándar para la producción de Biodiesel. [6].....	6
Figura 3.1: Diagrama general del proceso actual.....	8
Figura 3.2: Estado actual de la planta. Fuente propia.	11
Figura 3.3: Bomba centrífuga utilizada. Fuente propia.....	12
Figura 3.4: Diagrama de una bomba de engranaje.....	13
Figura 3.5: Diagrama de una bomba de engranaje.....	14
Figura 3.6: Diagrama de una bomba de tornillo.....	14
Figura 3.7: Filtros Spin-On.	16
Figura 3.8: Cañería de acero inoxidable.....	16
Figura 3.9: Estado de válvulas y accesorios.....	17
Figura 3.10: Estado de válvulas y accesorios.....	17
Figura 4.1: Esquema de sectores y su distribución.	18
Figura 4.2: Representación del sector 1.	19
Figura 4.3: Representación del sector 2.	20
Figura 4.4: Representación del sector 3.	20
Figura 4.5: Representación del sector 4	21
Figura 4.6: Representación completa del rediseño de la planta.	21
Figura 4.7: Filtro spin-on 3 μ	27
Figura 4.8: Filtro spin-on 25 μ	27
Figura 4.9: Filtro spin-on 12 μ	27

Índice de tablas

Tabla 4.1: Propiedades físicas y químicas del aceite de cocina	22
Tabla 4.2: Velocidades recomendadas para el aceite [17]	22
Tabla 4.3: Tabla comparativa para distintas bombas de engranajes.	23
Tabla 4.4: Dimensiones de los largos de cañería sector 1	24
Tabla 4.5: Accesorios para la sección 1	24
Tabla 4.6: Largos equivalentes para la succión en la bomba 1 [9].	25
Tabla 4.7: Accesorios sector 1, descarga.	26
Tabla 4.8: Cañerías y accesorios sector 2.	28
Tabla 4.9: Cañerías y accesorios sector 3.	29
Tabla 4.10: Cañerías y accesorios sector 4.	29
Tabla 4.11: Memoria de cálculo.....	30
Tabla 5.1: Listado de equipos y precios	31
Tabla 5.2: Estimación lineal del precio de combustible.....	32
Tabla 5.3: Consumo de las bombas.....	33
Tabla 5.4: Consumo de los procesos principales.	34
Tabla 5.5: Costo para los cargos.	35
Tabla 5.6: Flujo de caja.	35
Tabla 5.7: Indicadores económicos del proyecto.	36

Nomenclatura:

Glosario

VAN	:	Valor actual neto
TIR	:	Tasa interna de retorno

Símbolos

h_l	:	Pérdida de carga
f	:	Factor de fricción
l	:	Largo de cañería
K	:	Coefficiente de pérdidas menore
g	:	Constante gravitatoria
P	:	Presión
v	:	Velocidad
\dot{W}	:	Potencia
Q	:	Caudal
m	:	Masa
C_p	:	Calor específico
T	:	Temperatura
q	:	Calor

Subíndices

Succ.	:	Succión
Desc.	:	Descarga
S1	:	Sector 1
S2	:	Sector 2
S3	:	Sector 3
S4	:	Sector 4
e	:	Equivalente
Bba.	:	Bomba
nominal	:	Nominal
sistema	:	Sistema

Prom. : Promedio
Biodiesel : Biodiesel
Glicerol : Glicerol

Letras Griegas

\emptyset : Diámetro de cañería
 ρ : Densidad
 Δ : Variación
 ν : Viscosidad cinemática
 ε : Rugosidad

Capítulo 1. Introducción.

1.1 Presentación del problema

La Municipalidad de Hualpén posee una planta de producción de biodiesel que utiliza aceite de cocina usado como materia prima. A través de un proceso químico conocido como transesterificación, este aceite se convierte en un combustible adecuado para motores de combustión diésel. Sin embargo, hace seis años, la planta dejó de operar debido a daños en sus equipos, y con el tiempo, se han perdido elementos y equipos esenciales para su funcionamiento.

Dada esta problemática, la Municipalidad de Hualpén se ve en la necesidad de reactivar la planta, debido a que cuenta con un programa de recolección de aceite de cocina usado de los sectores circundantes, principalmente de la caleta de Lenga. El objetivo es sintetizar biodiesel para el uso en los equipos municipales, como los camiones recolectores de basura, con el fin de mitigar el impacto ambiental. Además, como subproducto del proceso se obtiene glicerol, un compuesto no tóxico que se planea distribuir a emprendedores locales para la elaboración de jabones y otros productos cosméticos.

Este proyecto implica un rediseño de la planta de biodiesel con el propósito de reiniciar la producción y reducir el impacto ambiental en la comuna. La propuesta se fundamenta en una investigación bibliográfica que identifica nuevas tecnologías para optimizar el proceso y mejorar la calidad del producto final.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Proponer un rediseño de la planta de Biodiesel de la Municipalidad de Hualpén. Este rediseño incluirá la evaluación de los equipos críticos con miras a su reparación o sustitución por alternativas eficaces y rentables. Además, se llevará a cabo una propuesta económica que respalde la viabilidad financiera del proyecto, buscando el retorno de la inversión en un plazo de 5 a 7 años. El propósito final es reactivar la producción de biodiesel en el año 2024, asegurando un funcionamiento óptimo y sostenible de la planta.

1.2.2 Objetivos específicos

- 1) Identificar los equipos críticos, su estado actual y su contribución en la producción, a través de inspecciones en terreno que permitan establecer un diagnóstico de la condición operativa de cada uno.
- 2) Determinar opciones de mejora en el funcionamiento de la planta, mediante la revisión de fuentes bibliográficas especializadas, con el objetivo de optimizar la producción de biocombustible y garantizar un proceso eficiente.
- 3) Plantear una propuesta económica, evaluando costos, presupuestos e inversiones proyectados en un periodo de 5 a 7 años, con el fin de verificar el retorno de la inversión.

1.3 Metodología de trabajo

Con el propósito de cumplir con el objetivo general del proyecto, se describe la siguiente metodología:

- 1) Documentación de los equipos involucrados: Se detallan las funciones específicas de cada equipo en las distintas etapas de producción de Biodiesel en la planta de la Municipalidad de Hualpén, recopilando información de los documentos técnicos proporcionados por el Municipio.

- 2) Revisión del estado actual de la planta: se programan visitas a terreno, en donde se realizan inspecciones visuales para buscar daños, roturas y/o defectos presentes en los equipos críticos. Además, se realizan pruebas de funcionamiento en donde se mide continuidad de voltaje con multímetros y mediciones presión con manómetros. Luego de realizada la inspección, los equipos se clasifican en equipo sin daños, daños menores, los cuales pueden ser reparados, y en mayores los cuales requieren reemplazo.
- 3) Investigación de nuevas tecnologías: se establece como motor de búsqueda ScienceDirect y Google Scholar, ocupando palabras claves como Biodiesel, waste cooking oil, Methyl Ester y transesterification, para obtener métodos de fabricación del biocombustible, propiedades químicas y físicas de los fluidos utilizados y tecnologías que optimicen el proceso.
- 4) Rediseño de la planta: se realiza una sectorización de la planta, identificando los procesos claves para la producción de Biodiesel, en la cual se proponen los equipos que deben ser cambiados, cumpliendo con los requerimientos necesarios de potencias, caudales y pérdida de carga.
- 5) Propuesta económica: se cotizan los equipos a reemplazar y reparar a través de distribuidores locales para determinar la inversión inicial. Se considera el ahorro derivado del uso de Biodiesel en lugar de Diesel en los equipos municipales como valor de producción. Además, se calcula el costo eléctrico necesario para mantener la planta operativa. Los gastos operacionales se estiman según valores sugeridos por la Municipalidad de Hualpén. Estos datos se utilizan para realizar un flujo de caja que evalúa la viabilidad del proyecto mediante cálculos del valor actual neto, tasa interna de retorno y período de recuperación.

Capítulo 2. Marco teórico.

2.1 Definición y clasificación de los combustibles.

Cualquier material que puede quemarse para liberar energía recibe el nombre de combustible. La mayoría de los combustibles conocidos se componen principalmente de hidrógeno y carbono y estos reciben el nombre de combustibles de hidrocarburos y se denotan por la fórmula general C_nH_m . [1]

Los combustibles, de acuerdo con su origen, pueden clasificarse en fósiles y no fósiles.

- Fósiles: son aquellos que se han formado en base a seres orgánicos como plantas, animales y otros organismos vivos que existieron hace ya bastante tiempo en la Tierra. De aquellos, se puede mencionar el petróleo, gas natural.
- No fósiles: son biocombustibles generados a través de métodos químicos como la fermentación de azúcares y carbohidratos, la transesterificación de aceites y grasas y la digestión anaeróbica de residuos orgánicos obteniendo respectivamente bioetanol, Biodiesel y biogás.

En la clasificación de biocombustible, también se puede mencionar la biomasa, como, por ejemplo, la madera, que posee renovación tardía, dependiendo totalmente del crecimiento de los árboles. [2]

2.2 Clasificación de los biocombustibles. [3]

En base al tipo de materia prima seleccionada para producir biocombustible, se tiene la siguiente clasificación.

- Primera generación: provienen de los cultivos agrícolas como de la caña de azúcar, remolacha, cebada, maíz, maravilla, soya, etc. Para así obtener tanto etanol como Biodiesel.
- Segunda generación: producidos fundamentalmente a partir de residuos sólidos urbanos y agrícolas, así como de biomasa de naturaleza leñosa. Son combustibles líquidos fabricados a

partir de la biomasa lignocelulósica de plantas. Su materia prima puede ser cualquier tipo de biomasa vegetal, desde desechos agrícolas o madereros hasta cultivos energéticos específicos.

- Tercera generación: se obtienen, principalmente, a través de las algas. La producción de aceite o combustible de algas conlleva la fermentación del carbohidrato del alga.



Figura 2.1: Diagrama de clasificación biocombustibles.

Fuente: Asociación Española de operadores de productos petrolíferos [3]

2.3 ¿Qué es el Biodiesel?

El Biodiesel es un biocombustible renovable producido a partir de fuentes naturales como aceites vegetales y grasas animales, el cual se utiliza como alternativa al diésel derivado del petróleo y, además, puede ser utilizado en motores diésel sin necesidad de modificarlos debido a su similitud en sus propiedades químicas.

2.4 Métodos de obtención del Biodiesel. [4]

- Pirólisis: es la descomposición térmica de las materias orgánicas en ausencia de oxígeno y en presencia de un catalizador. El material pirolizado puede ser aceites vegetales, grasas animales, ácidos grasos naturales o ésteres metílicos de ácidos grasos. La descomposición térmica de los triglicéridos produce alcanos, alquenos, aromáticos y ácidos carboxílicos.

- Dilución: principalmente, los aceites vegetales se diluyen con diésel para reducir la viscosidad y mejorar el rendimiento del motor. Este método no requiere ningún proceso químico.
- Microemulsión: se define como una dispersión coloidal de equilibrio de una estructura microscópica fluida ópticamente isotrópica con dimensiones generalmente en el rango de 1 a 150 nm, formada espontáneamente a partir de dos líquidos inmiscibles y uno o más anfífilos que son sustancias hidrófobas y lipófila al mismo tiempo. Investigadores han estudiado microemulsiones utilizando solventes como metanol, etanol, hexanol, butanol y 1-butanol. Las microemulsiones con estos solventes han cumplido con los requisitos máximos de viscosidad para el combustible diésel. Se ha demostrado que el rendimiento a corto plazo de microemulsiones iónicas y no iónicas de etanol acuoso en aceite de soja es casi tan bueno como el del combustible diésel No. 2.
- Transesterificación: La transesterificación se considera el mejor método entre otros enfoques debido a su bajo costo y simplicidad [5]. El Biodiesel es el principal producto de este proceso. La transesterificación consiste en una serie de reacciones reversibles consecutivas. En estas reacciones, los triglicéridos se convierten paso a paso en diglicéridos, monoglicéridos y, finalmente, glicerol que se hunde hasta el fondo y biodiésel que flota en la parte superior y se puede extraer. El subproducto, el glicerol, puede quemarse para generar calor o usarse como materia prima en la industria cosmética. En esta reacción, el metanol y el etanol son los dos principales alcoholes ligeros utilizados para el proceso de transesterificación debido a su costo relativamente bajo. Sin embargo, también se pueden emplear propanol, isopropanol, terc-butanol, alcoholes ramificados y octanol y butanol, pero el costo es mucho mayor.

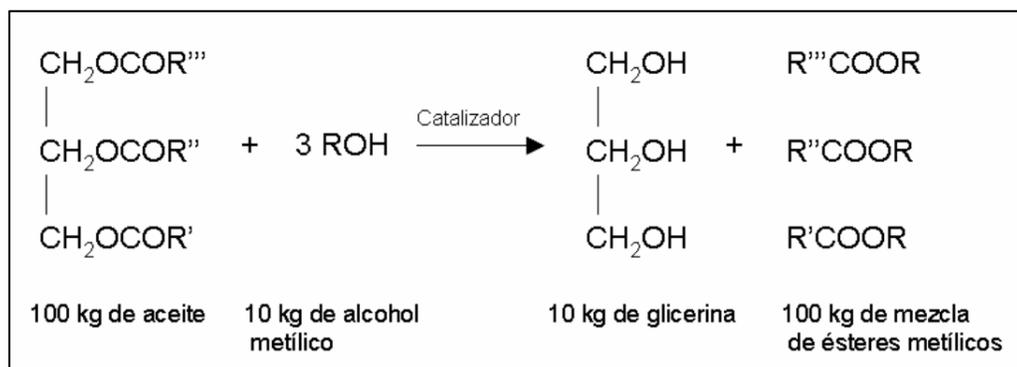


Figura 2.2: Reacción química estándar para la producción de Biodiesel. [6]

Capítulo 3. Análisis general de la planta.

3.1 Descripción de los equipos de planta de Biodiesel.

La planta opera mediante el proceso de transesterificación, el cual involucra los siguientes equipos responsables de ejecutar dicho proceso.

- Calentador: lleva la materia prima a una temperatura de 50 °C durante 20 minutos.
- Mezclador: mezcla la soda caustica con el metanol durante 10-15 minutos formando metóxido de sodio.
- Reactor: mezcla el metóxido y la materia prima durante 30-35 minutos a 60-65°C a una presión de 1,3 bar.
- Decantador: se separa el glicerol y el Biodiesel por gravedad.
- Acumulador de Biodiesel: acumula el Biodiesel obtenido en el decantador.
- Acumulador de Glicerol: acumula el glicerol.
- Bomba centrifuga: desplaza el fluido.
- Compresor: llevar la presión del reactor a 1,3 bar.

3.2 Funcionamiento actual de la planta de Biodiesel.

El funcionamiento se da mediante una bomba centrifuga que está conectada al reactor y que su vez, está conectada a todos los equipos. Esta ayuda a movilizar la materia prima y las reacciones posteriores a cada uno de los procesos descritos en la parte superior. También el proceso se ayuda con un sistema de válvulas que permiten el paso o corte de fluido hacia los otros procesos.

3.3 Descripción del proceso de elaboración:

El procesos de elaboración de Biodiesel actualmente es del tipo discontinuo o Batch el cual se enfoca en producción en donde se considera trabajar con una recolección mensual mínima de 200 L de aceite de cocina.

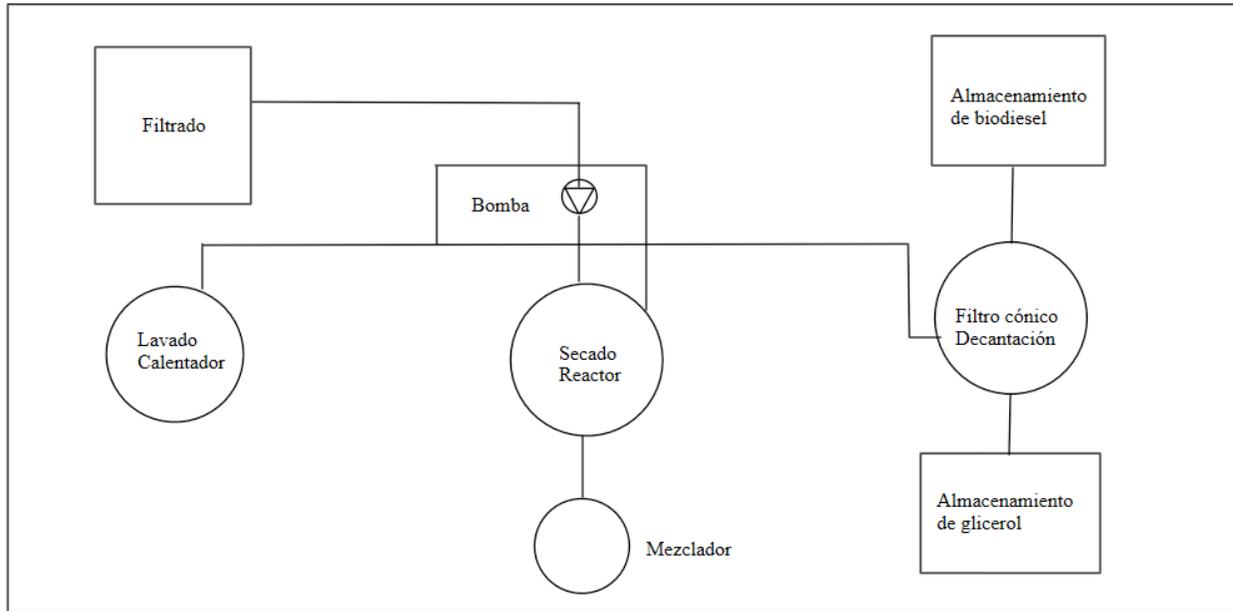


Figura 3.1: Diagrama general del proceso actual.

- 1) Filtrado: al descargar el aceite en los estanques, se realiza un filtrado mediante un tamiz estático de malla fina que permite eliminar las impurezas con granulometría mayor a 1 mm. El desecho es envasado en contenedores especialmente habilitados para ser retirados por una empresa autorizada.

- 2) Lavado: el proceso de lavado de aceite es un proceso para eliminar impurezas, contaminantes y residuos no deseados.
 Este, se lava con agua caliente entre 60°C y 70 °C. Esto se logra por el arrastre de partículas a través del agua. Se requiere para poder realizar este proceso, un volumen del agua equivalente al 50% de la materia prima inicial, proyectando un valor de 100 L de agua.

- 3) Decantación: este proceso tiene por objetivo separar el agua del aceite. Se continua con un proceso discontinuo el cual tiene una duración de 48 horas. Este proceso es realizado en el mismo estanque donde fue realizado el proceso de lavado.
 Las aguas resultantes del proceso de decantación son transportadas vía cañería hasta la cámara de decantación especialmente construida para el proceso.
 Luego de esta etapa, el aceite está en condiciones de pasar al proceso de secado.

Los sedimentos arrastrados por el agua se depositan en el fondo del estanque. Estos son acumulados con los desechos recolectados en la etapa de filtrado y tendrán el mismo tratamiento de disposición final.

- 4) Secado del aceite: previo al proceso de reacción, se debe extraer toda traza de agua por lo que es sometido a un proceso de secado. Es efectuado en un estanque que tiene una capacidad de 500 litros y posee un calefactor eléctrico que aumenta la temperatura del aceite hasta 110° C, temperatura que es controlada por un termostato.

El proceso de cada batch de aceite tiene una duración de 60 min.

- 5) Preparación del metóxido: el metóxido es la mezcla de alcohol metílico y el catalizador seleccionado para este proceso que corresponde a la soda cáustica. Esta preparación es realizada en un estanque de acero al carbono. Contiene un elemento mezclador, una entrada para la soda, una conexión para el estanque de metanol, una conexión al estanque reactor. Además, tiene un elemento calefactor eléctrico controlado por termostatos.

La capacidad de este estanque es de 100 litros.

La preparación de metóxido, se requiere una proporción de 30,58 kg de metanol por cada 1 kg de soda caustica.

Una vez homogeneizada la mezcla del metanol y el catalizador a una temperatura de 50°C, esta se encuentra en condiciones de ser trasvasijada al reactor. Esta operación de traspaso es realizada a través de cañerías especialmente implementadas para este objetivo.

- 6) Alcoholisis: la alcoholisis tiene por objeto bajar la densidad del aceite. Es un proceso discontinuo. La cantidad de batch a producir es en función directa del volumen de producción de Biodiesel programado para el día.

La alcoholisis es realizada en un estanque denominado reactor. Este, es un estanque de acero al carbono acondicionado para recibir hasta 7 atm de presión e incluye un calefactor eléctrico para mantener la tempera de la rección, mezclado estático y una bomba de recirculación. Este proceso se realiza a una temperatura de 65°C y una presión de 2 atm. El reactor además posee una válvula de seguridad para evitar que se superen las 2 atm mencionadas.

Al reactor, se introduce el metóxido y el aceite en las cantidades preestablecidas donde se procede a dar el inicio al proceso de mezclado que tiene una duración aproximada de 60 minutos.

Una vez transcurrido el proceso, la mezcla es traspasada a un decantador, destinado precisamente para la separación por gravedad de los productos generados por la reacción los cuales son Biodiesel y glicerol.

- 7) Decantación: el producto de la reacción es transportado al estanque denominado decantador, con capacidad suficiente para recibir al menos la producción de un batch de producto del reactor. El decantador es un estanque cerrado, de acero al carbono y revestido de aislante de temperatura (lana de vidrio) destinado a disminuir la transferencia de calor desde su interior al exterior.

El proceso de decantación es de tipo batch el cual requiere 8 horas para poder obtener la separación de ambas fases del producto: Biodiesel y Glicerol.

Una vez transcurrido el tiempo se obtiene en la parte superior del decantador el Biodiesel mientras que en la parte inferior se obtiene el glicerol.

Se estima que el proceso tiene una proporción de 1:9 de glicerol por Biodiesel en donde este último es llevado a un proceso de clarificación mediante la bomba centrífuga.

- 8) Clarificación de Biodiesel: el Biodiesel extraído del decantador es bombeado a través de un filtro ciclónico y el producto es filtrado y enviado al estanque de almacenamiento de Biodiesel.

El equipo clarificador contiene un filtro textil que retiene toda partícula sobre 5 micrones que pudiera contener el Biodiesel.

Como resultado, se espera obtener Biodiesel exento de partículas sobre 5 micrones, el que será bombeado a través de las cañerías a un estanque diseñado para esto.

Por su parte, todas las partículas acumuladas, se trasvasiarán al estanque de glicerol.

- 9) Almacenamiento de Biodiesel: el Biodiesel obtenido, es depositado en un estanque de acero al carbono. Estos son ubicados en la intemperie en un sector separado del almacenamiento de

aceite, metanol y Glicerol. Este estanque dispondrá de un medidor de nivel tipo visual y un medidor de flujo.

10) Almacenamiento de Glicerol: el producto obtenido como glicerol será bombeado directamente al estanque de almacenamiento instalado para tales efectos. Este es de fibra de vidrio e ira montado sobre una estructura metálica. También se encuentra ubicado al intemperie como el caso del estanque de Biodiesel.



Figura 3.2: Estado actual de la planta. Fuente propia.

3.4 Resultados de las inspecciones.

Durante las visitas a la planta, se llevó a cabo un diagnóstico de los equipos críticos para la síntesis de Biodiesel. Se identificó que la bomba centrífuga, encargada de la distribución de la materia prima, presenta daños significativos, como cortes en las líneas de alimentación eléctrica y roturas estructurales. Además, los componentes más pequeños, como válvulas, interruptores eléctricos y

cableado de conexión, no estaban disponibles para realizar pruebas en este equipo. Por consiguiente, se tomó la decisión de proceder con su reemplazo.



Figura 3.3: Bomba centrífuga utilizada. Fuente propia

Los estanques de almacenamiento se inspeccionaron visualmente y no presentaron daños visibles en su estructura, por lo que podrán ser utilizados dentro del proceso sin necesidad de reemplazo. Para la inspección del compresor, se realizó una prueba de funcionamiento que incluyó arranque y parada para verificar si este cumple su función adecuadamente. La prueba consistió en la observación de daños en los componentes eléctricos y electrónicos del compresor, además de una prueba de presión de salida con un manómetro para verificar que se estuviese entregando la presión necesaria al sistema. Este equipo se clasificó sin fallas.

Debido a la falta de muestras del Biodiesel producido, se decide llevar a cabo una investigación con los responsables del área de medioambiente de la Municipalidad. Estos informan que, al emplear el combustible producido, se detectó un problema en un componente crucial para la distribución del combustible en los motores Diesel: los inyectores. Estos inyectores tienen la función de suministrar la cantidad precisa de combustible al motor en el momento adecuado para asegurar una combustión eficiente y una óptima economía de combustible. Todos los equipos que utilizaron este Biodiesel experimentaron el mismo problema. La calidad de este producto puede estar relacionada con el tipo de bomba utilizada y su distribución. Una bomba centrífuga, al operar a altas revoluciones, puede

generar emulsión en el aceite de cocina, lo que impide que ocurra la reacción química necesaria para la preparación del Biodiesel. [7].

En base a los resultados obtenidos, se recomienda utilizar una bomba especializada para la movilizar el aceite para que trabaje a menor caudal y evite que el aceite se emulsione. Una bomba de este tipo podría mejorar la calidad del Biodiesel y prevenir los problemas observados en los inyectores.

Como propuesta se tiene:

- 1) Bomba de engranaje: Son de reducido costo y se utilizan principal es para aplicaciones en potencia de fluidos. Se compone de dos engranajes que giran dentro de una carcasa en sentido contrario [8]. Los caudales más frecuentes en el mercado oscilan entre 0,5 l/min y 225 l/min para velocidades optimas de giro de 1500 rpm además de poder trabajar a altas presiones de trabajo continuo en donde en el mercado se pueden encontrar de hasta 275 bar para presiones continuas y 300 bar para presiones intermitentes [9].

Para las recomendaciones de esta bomba, se recomienda trabajar con fluidos que tengan:

- Temperatura cercana a los 50°C
 - Filtros de aspiración de por lo menos 125 μm y para el retorno de mínimo 40 μm .
- [14]

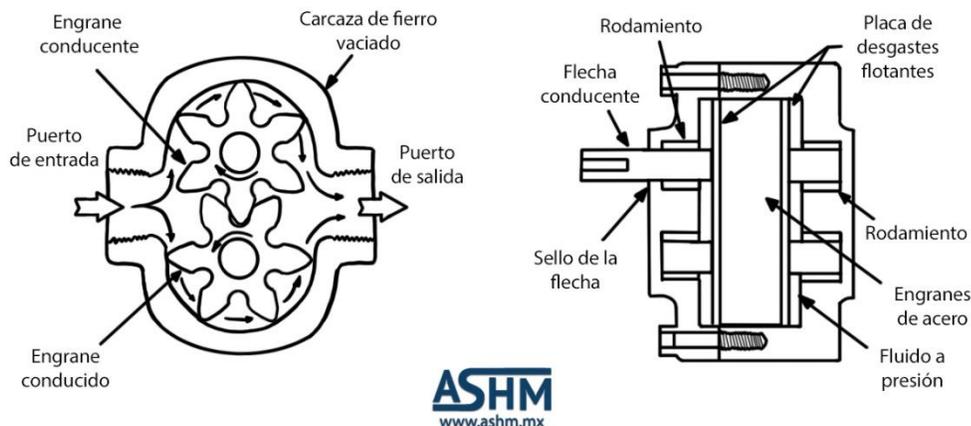


Figura 3.4: Diagrama de una bomba de engranaje.

Fuente: Aceros y sistemas hidráulicos de México [10]

- 2) Bombas de paleta: Consisten en un rotor excéntrico que contiene un conjunto de paletas deslizantes que corren dentro de una carcasa. El fluido entra por el puerto de succión, es capturado en un espacio entre dos aspas y así se lleva al puerto de descarga. [9]

Dentro de las recomendaciones que se pueden agregar respecto a esta bomba, se tiene: [8]

- No superar los 70 bar de presión de trabajo.
- Temperaturas de trabajo de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $70\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Filtros de entre $25\mu\text{m}$ y $40\mu\text{m}$

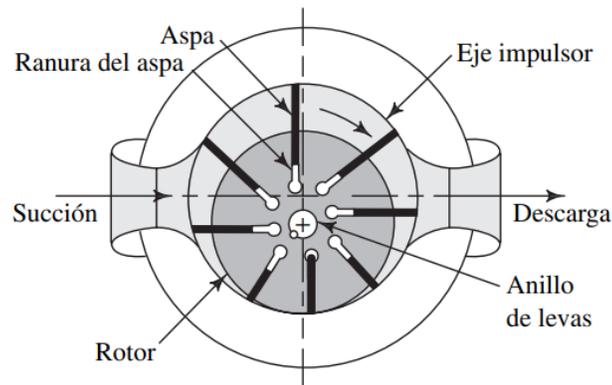


Figura 3.5: Diagrama de una bomba de engranaje.

Fuente: Robert Mott, Mecánica de fluidos. [9]

3) Bombas de tornillo: Bombas especializadas en movilizar caudales con rango de acción muy amplios además de trabajar con presiones desde 20 bar hasta 175 bar. [8]

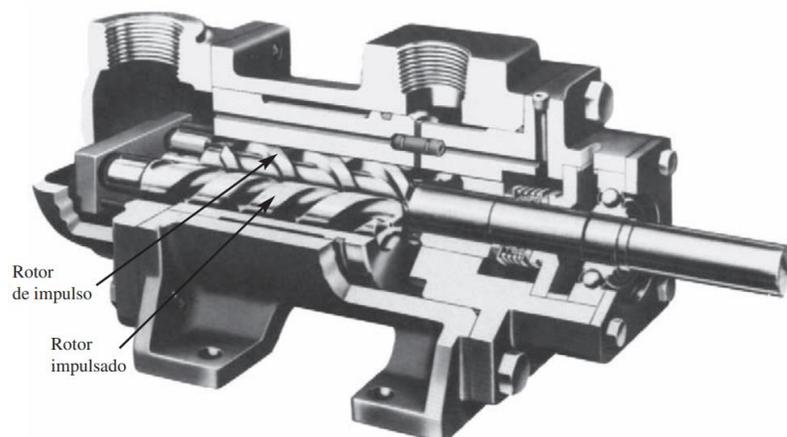


Figura 3.6: Diagrama de una bomba de tornillo.

Fuente: Robert Mott, Mecánica de fluidos. [9]

Las opciones mencionadas, comparten similitudes al transportar fluidos viscosos como aceites, lubricantes, polímeros, entre otros. Las diferencias clave al elegir la bomba adecuada en esta situación se centran en el costo inicial y de mantenimiento. Las bombas de engranaje y de paleta destacan por su bajo costo tanto en adquisición como en mantenimiento [9]. Por el contrario, las bombas de tornillo presentan una construcción más compleja lo que genera un aumento en el costo de esta y de su mantenimiento [9]

Considerando esta información, se decide seleccionar la bomba de engranaje debido a su versatilidad con diversos tipos de fluidos, así como a sus rangos de presión y temperatura adecuados para el funcionamiento óptimo de los equipos y fluidos en la planta de Biodiesel.

Una segunda recomendación para el correcto funcionamiento de la planta, es agregar un elemento filtrante que elimine las partículas del aceite de cocina, ya que este contiene elementos orgánicos debido al uso que se le da en la preparación de alimentos.

En el área hidráulica, se utilizan diversos tipos de filtros para eliminar partículas contaminantes de los fluidos hidráulicos. Estos filtros pueden ser clasificados en [11] [12] [13]:

1) Filtros de malla metálica:

- Fuente de contaminación: Partículas grandes como virutas metálicas, suciedad y residuos.
- Características: Capturan partículas a través de una malla metálica porosa.

2) Filtros de cartucho:

- Fuente de contaminación: Partículas de tamaño medio a pequeño como sedimentos, óxidos y partículas biológicas.
- Características: Utilizan un cartucho con material filtrante para retener las partículas.

3) Filtros de membrana:

- Fuente de contaminación: Partículas microscópicas.
- Características: Utilizan una membrana semipermeable para filtrar partículas muy pequeñas.

4) Filtros centrífugos:

- Fuente de contaminación: Partículas sólidas en suspensión y contaminantes pesados.
- Características: Utilizan la fuerza centrífuga para separar las partículas del fluido.

Considerando las particularidades del proceso, que involucra sedimentos orgánicos de diversos tamaños, se decide elegir un filtro Spin-On. Estos filtros cuentan con cartuchos desechables especializados para líneas de succión y están disponibles en diferentes tamaños para la filtración de partículas. Además, pueden ser agrupados en serie para mejorar la calidad del filtrado.



Figura 3.7: Filtros Spin-On.

Fuente: Eximetec [14]

Una tercera recomendación es utilizar un sistema de cañerías adecuado para procesos químicos. Dentro de estos se tiene las cañerías de acero inoxidable ya que es un producto resistente a la corrosión utilizadas principalmente en industrias petroquímicas, mineras y de celulosa. [15]



Figura 3.8: Cañería de acero inoxidable.

Fuente: Otero Industrial [15]

Como cuarta recomendación, se considera el cambiar todas las válvulas y accesorios. Debido a la corrosión y las condiciones de nulo mantenimiento, los elementos descritos se encuentran en condiciones no óptimas para el funcionamiento.



Figura 3.9: Estado de válvulas y accesorios.

Fuente: Propia

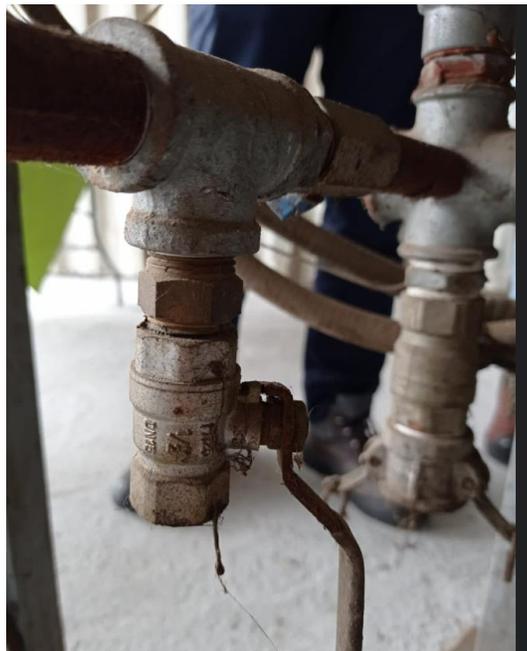


Figura 3.10: Estado de válvulas y accesorios.

Fuente: Propia

Capítulo 4. Planteamiento del rediseño.

4.1 Sectorización

En función de las recomendaciones antes señaladas, se procede a realizar una reestructuración de la planta que permita obtener una mayor pureza del producto final.

Como en el proceso descrito solo se ocupaba una bomba centrífuga y una de las recomendaciones es cambiar esta por una bomba especializada en traslado de aceite, se propone una sectorización de los procesos principales de la planta los cuales llevaran cada uno una bomba.

Considerando también que el lugar donde esta operará consta de 36 m², se realiza un diseño para que la planta quepa dentro del espacio señalado. Para esto también, se agrega la longitud de las cañerías que conectan este proceso químico.

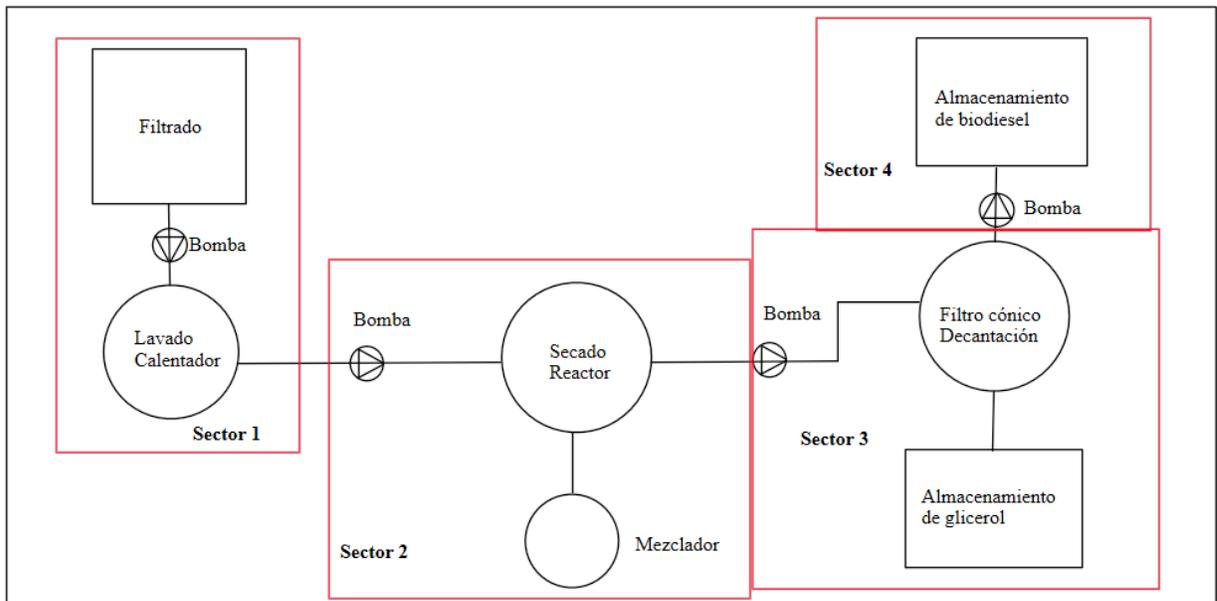


Figura 4.1: Esquema de sectores y su distribución.

Sector 1: al recibir el aceite en la planta, se depositará en un estanque de 1000 litros. Aquí, se utilizará una malla de monofilamentos en la parte superior del recipiente para filtrar las partículas de residuos de cocina de mayor tamaño. Esta etapa actúa como filtrado primario para reducir la cantidad de residuos en el fluido a trabajar. A continuación, se conectará un banco de filtros Spin-On que actuará como filtrado secundario, capaz de manejar partículas de diferentes tamaños. Luego, se conectará la primera bomba que moverá el fluido hacia el calentador, donde el aceite será sometido a la primera parte del proceso, que corresponde al lavado y al secado del aceite. Esta descripción se presenta en la figura 4.2.

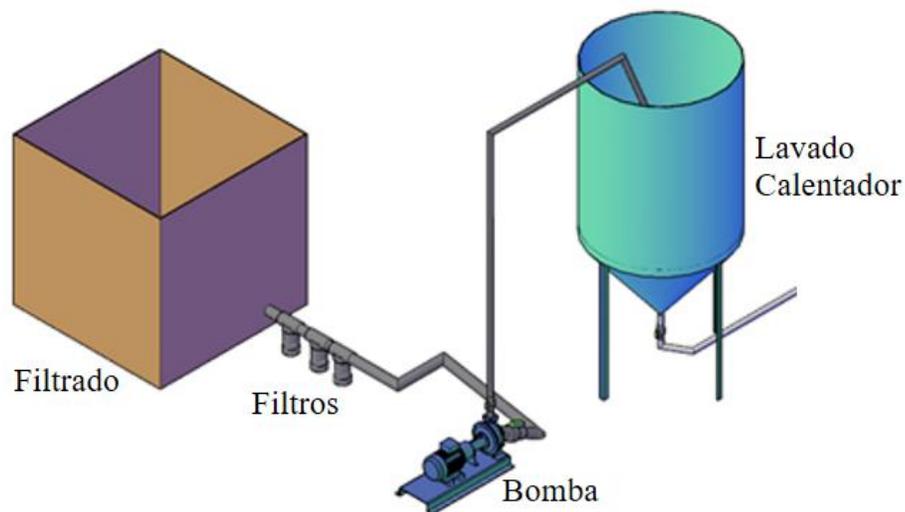


Figura 4.2: Representación del sector 1.

Sector 2: una vez que el aceite ha pasado por el proceso de secado y está libre de impurezas, se procede a transferirlo al sector dos. En esta etapa, una nueva bomba se encargará de llevar el fluido al reactor y, al mismo tiempo, mezclar la solución de aceite con el metóxido previamente preparado. El metóxido se añade desde un estanque superior por gravedad. Esta operación se detalla en la figura 4.3.

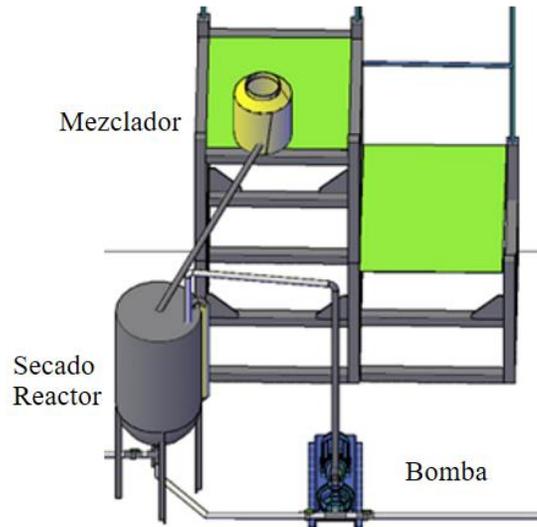


Figura 4.3: Representación del sector 2.

Sector 3: Para este sector, se utilizará una bomba diferente que se encargará de trasladar la mezcla de glicerol y Biodiesel hacia el decantador, donde se separará la mezcla debido a la diferencia de densidades. Una vez finalizado el proceso de decantación, el glicerol, que se encuentra en la parte inferior, será enviado a un estanque mediante una válvula conectada a una cañería que sale del decantador por gravedad. Al finalizar, solo quedará el Biodiesel en el estanque principal. Este diseño se puede apreciar en la figura 4.4.

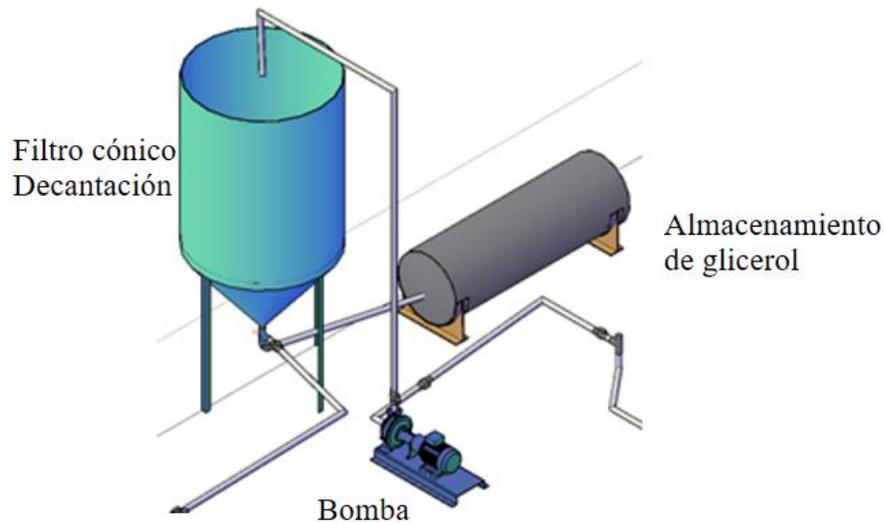


Figura 4.4: Representación del sector 3.

Sector 4: Este sector se compone de un estanque que tiene por función almacenar el Biodiesel producido. Se dispone de una bomba que traslada únicamente el Biodiesel producido desde el decantador hacia el estanque de acumulación, como se muestra en la figura 4.5.

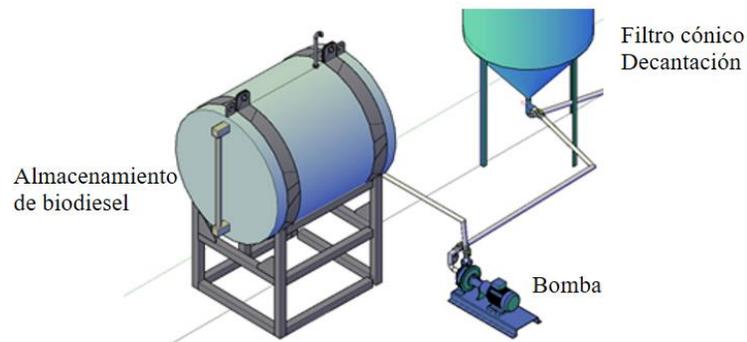


Figura 4.5: Representación del sector 4

En la siguiente figura, se muestra una representación completa de la planta con cada uno de los sectores mencionados anteriormente.

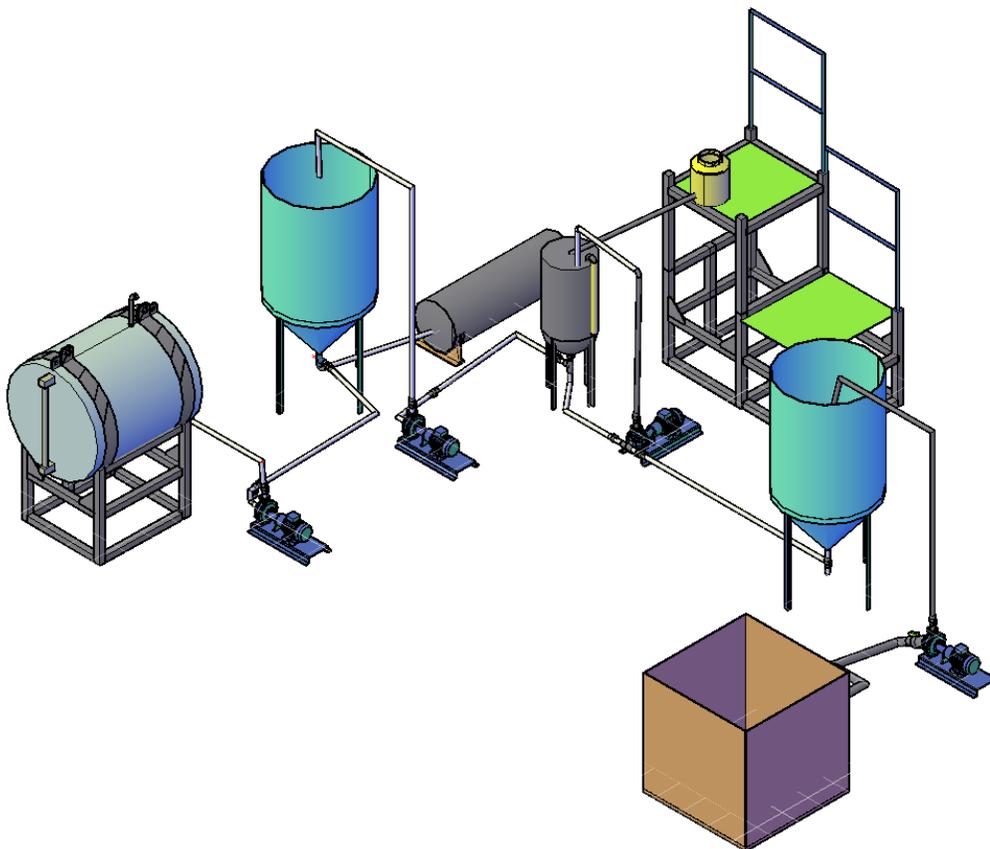


Figura 4.6: Representación completa del rediseño de la planta.

4.2 Dimensionamiento de equipos y accesorios.

Para el dimensionamiento, se analizará cada zona propuesta individualmente.

En el diseño propuesto, el sector 1 considera que el movimiento del fluido se va a realizar por una bomba a través de cañerías de acero inoxidable. Esta zona contiene filtros a la salida del estanque para eliminar la mayor cantidad de partículas.

Se consideran las siguientes propiedades promedio para el aceite de cocina usado [16].

Tabla 4.1: Propiedades físicas y químicas del aceite de cocina

Propiedades	Desechos de aceite de cocina		
índice de acidez (mg KOH/gm)	28,5	1,86	35,4
Valor de saponificación (mg KOH/gm)	175,87	181,25	234,71
Viscosidad cinemática (mm²/s)	46,97	42,01	-
Densidad (kg/m³)	908	-	906
Ácidos grasos libre (%)	14,25	-	18
Punto de inflamación (°C)	223	234	-
Humedad (%)	-	0,1	0,136

Además, se considera la siguiente tabla en función de la presión y velocidades recomendadas para fluidos en tuberías de aceite.

Tabla 4.2: Velocidades recomendadas para el aceite [17]

Tubería de aspiración. [m/s]	Tubería de retorno [m/s]	Tubería de presión						
		Presión [kg/cm ²]	0-10	10-25	25-50	50-100	100-150	150-200
0,5 – 1,5	2	Velocidad [m/s]	3	3,5	4	4,5	5	5,5

Considerando lo que se muestra en la tabla 4.2, la succión de la bomba se considerará como vía de aspiración por lo que la velocidad recomendada para la cañería es de entre 0,5-1,5 m/s y para la descarga se considera inicialmente como una vía de presión de hasta 10 bar. Con esta suposición para la descarga, y con la velocidad de 3 m/s máximo en la cañería, se realizará un proceso de cálculo en donde se verificarán las pérdidas de carga que debe vencer la bomba para desplazar los fluidos de cada etapa.

Además, debido a la capacidad de la planta y a la baja velocidad que necesita el aceite para ser transportado, se aplica un criterio de selección de bomba con base en los caudales y los diámetros de succión y descarga dados por catálogo [18]. En este, se considera diámetros de las conexiones de succión y descarga y el caudal nominal a 1450 rpm para poder realizar los cálculos. Esto mediante la ecuación de continuidad para verificar las velocidades necesarias para el sistema.

Tabla 4.3: Tabla comparativa para distintas bombas de engranajes.

Código	Catalogo	Conexiones BSP		Caudal [GPM]	Caudal [m ³ /s]	Velocidad , Succ. [m/s]	Velocidad , Desc. [m/s]
		SUCC [pulg]	DESC [pulg]				
OLEBOM099	0APF1	1/4	1/4	0,38	0,00002	0,757	0,757
OLEBOM100	0PF1	1/4	1/4	0,38	0,00002	0,757	0,757
OLEBOM001	1PF1,1	3/8	3/8	0,42	0,00003	0,372	0,372
OLEBOM002	1PF2,1	3/8	3/8	0,81	0,00005	0,717	0,717
OLEBOM003	1PF3,2	3/8	3/8	1,24	0,00008	1,098	1,098
OLEBOM004	1PF4,0	3/8	3/8	1,55	0,00010	1,372	1,372
OLEBOM029	1PF6,0	3/8	3/8	2,32	0,00015	2,054	2,054
OLEBOM005	2PF6	1/2	1/2	2,32	0,00015	1,155	1,155
OLEBOM006	2PF8	3/4	1/2	3,09	0,00019	0,684	1,539
OLEBOM007	2PF12	3/4	1/2	4,64	0,00029	1,027	2,311
OLEBOM008	2PF14	3/4	1/2	5,41	0,00034	1,198	2,694
OLEBOM009	2PF16	3/4	1/2	6,19	0,00039	1,370	3,083
OLEBOM010	2PF20	3/4	1/2	7,73	0,00049	1,711	3,850
OLEBOM031	2PF27	3/4	1/2	10,44	0,00066	2,311	5,200
OLEBOM011	3PF27	1	3/4	10,44	0,00066	1,300	2,311
OLEBOM012	3PF34	1	3/4	13,15	0,00083	1,637	2,911
OLEBOM013	3PF39	1	3/4	14,7	0,00093	1,830	3,254
OLEBOM014	3PF43	1 1/4	1	16,63	0,00105	1,325	2,071
OLEBOM015	3PF51	1 1/4	1	19,72	0,00124	1,571	2,455
OLEBOM016	3PF60	1 1/4	1	23,2	0,00146	1,849	2,889
OLEBOM017	3PF78	1 1/4	1	30,16	0,00190	2,403	3,755
OLEBOM018	3PF89	1 1/4	1	34,41	0,00217	2,742	4,284

Considerando lo mencionado anteriormente, para la sección 1, se selecciona, en una primera instancia, la bomba OLEBOM008 que tiene un diámetro de succión de 3/4' y diámetro de descarga de 1/2' con un caudal nominal a los 1450 rpm 5,41 GPM o 20,48 l/min lo que llenaría el estanque de lavado de aceite en un tiempo aproximado de 25 min.

Luego, con estos datos de caudal, la longitud de las cañerías y los accesorios, se verificarán las pérdidas de carga en la sección 1.

Tabla 4.4: Dimensiones de los largos de cañería sector 1

Sector 1	Succión	Descarga
Largo de cañería [m]	2,1	3,2
Diámetro SCH 40 [mm]	20,9	15,8

Tabla 4.5: Accesorios para la sección 1

Succión		Descarga	
Accesorio	Cantidad	Accesorio	Cantidad
Codo 90°	3	Filtro Spin-On	3
Válvula de corte	1	Válvula de corte	1
Conexión a bomba	1	Codo 45°	1
		Conexión a bomba	1

Para determinar las pérdidas en el sector 1, se debe aplicar la ecuación de energía entre los puntos a estudiar.

Para las pérdidas de cargar en la succión, se plantea la siguiente ecuación.

$$hf = hf_{succ} + hf_{desc} \quad (1)$$

Donde,

$$hf = \left(f \frac{L}{\phi} + \sum k \right) \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

Para determinar el factor de fricción, se consideran los datos en la tabla 4.1, 4.4 y 4.5 los cuales permitirán realizar el cálculo del número de Reynolds en la succión

$$Re_{succ,S1} = \frac{D_{succ,S1} \cdot v}{\nu} = \frac{0,0209 \text{ m} \cdot 1,198 \text{ m/s}}{4,449 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 562,7 \quad (3)$$

Como el valor entregado por el número de Reynolds es menor que 2300, se considera al fluido en régimen laminar.

Para determinar el factor de fricción en la cañería se considera la siguiente expresión para flujo laminar.

$$f = 64/Re_{succ,S1} = 64/562,7 = 0,1137 \quad (4)$$

Para el cálculo de las pérdidas generadas por los accesorios, se aplicará el método del largo equivalente considerando los elementos mostrados en la tabla 4.5. Estos se pueden apreciar en la tabla 4.6.

Tabla 4.6: Largos equivalentes para la succión en la bomba 1 [9].

Succión		
Accesorio	Cantidad	Le/D
Codo 90°	3	3*30
Válvula de corte	1	45
Conexión a bomba	1	10

Aplicando la relación:

$$\sum k_{succ,S1} = (\sum L_e/D)f = (3 \cdot 30 + 45 + 10) \cdot 0,1137 = 16,49 \quad (5)$$

Así, reemplazando en la ecuación anterior, se obtiene la pérdida de carga en metros.

$$h_{f_{succ,S1}} = \left(f \frac{L}{\phi} + \sum k \right) \frac{v^2}{2g} = 1,206 \text{ [m]} \quad (6)$$

Aplicando la Ecuación de Darcy- Weisbach y considerando la densidad como se muestra en la tabla 4.1, la pérdida de presión en la cañería queda determinada por la siguiente expresión:

$$\Delta P_{S1} = hf_{S1} \rho g = 10,742 \text{ kPa} \quad (7)$$

Para la descarga, se realiza el mismo procedimiento descrito anteriormente, en donde se requiere determinar el factor de fricción en la descarga y los largos equivalentes para los accesorios. Además, para los filtros, se utilizará los gráficos entregados por el fabricante para determinar las pérdidas de presión.

Tabla 4.7: Accesorios sector 1, descarga.

Descarga		
Accesorio	Cantidad	Le/D
Filtro Spin-On	3	-
Válvula de corte	1	45
Codo 45°	1	16
Conexión a bomba	1	10

El número de Reynolds en la descarga queda determinado en la siguiente expresión:

$$Re_{desc,S1} = \frac{D_{desc,S1} \cdot v_{desc,S1}}{v_{Aceite}} = \frac{0,0158 \text{ m} \cdot 2,694 \text{ m/s}}{4,449 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 956,7 \quad (8)$$

Al ser régimen laminar, se aplica nuevamente la siguiente expresión.

$$f_{desc} = 64/Re_{desc,S1} = 64/956,7 = 0,06689 \quad (9)$$

Aplicando la relación

$$\sum k_{desc,S1} = \left(\sum L_e/D \right) f_{desc,S1} = (45 + 16 + 10) \cdot 0,06689 = 4,749 \quad (10)$$

Así, reemplazando en la ecuación anterior, se obtiene la pérdida de carga en metros.

$$h_{f_{desc1}} = \left(f_{desc,S1} \frac{L_{desc,S1}}{\phi_{desc,S1}} + \sum k_{desc,S1} \right) \frac{v_{desc,S1}^2}{2g} = 6,768 \text{ [m]} \quad (11)$$

Aplicando nuevamente la ecuación de Darcy- Weisbach, se obtiene la pérdida de presión sin considerar los filtros.

$$\Delta P_{S1} = hf_{S1} \rho g = 60,289 \text{ kPa} \quad (12)$$

Para la presión de los filtros, se consideran los siguientes gráficos entregados por el fabricante como se muestran en las figuras 4.7, 4.8 y 4.9.

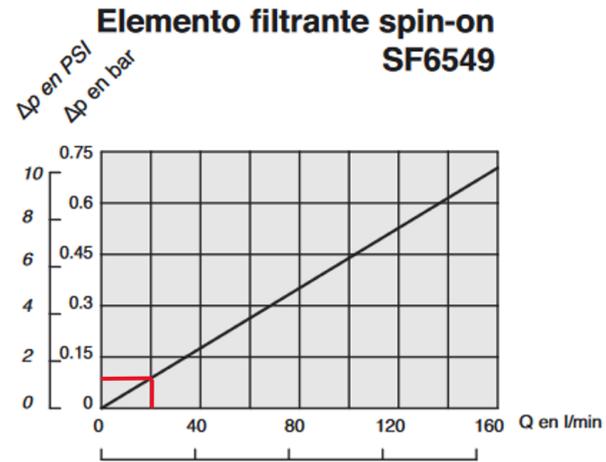


Figura 4.7: Filtro spin-on 3 μ .

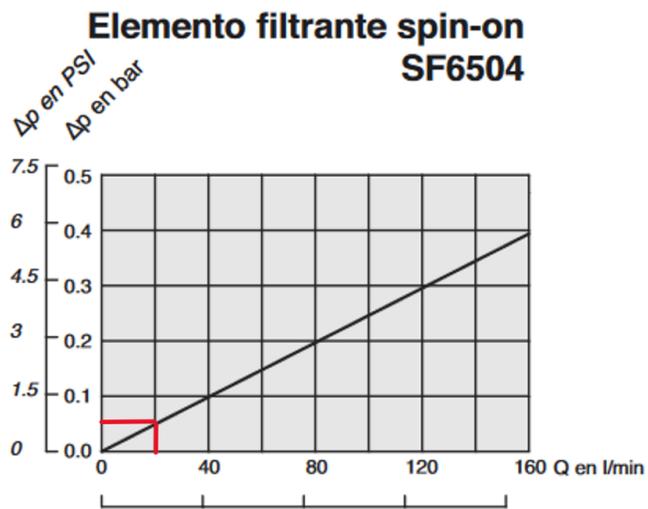


Figura 4.8: Filtro spin-on 25 μ .

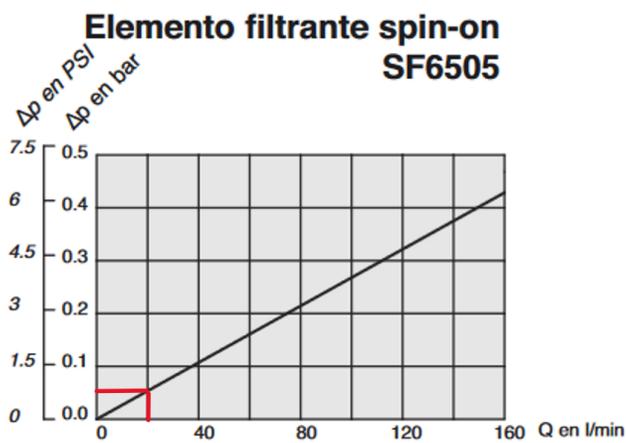


Figura 4.9: Filtro spin-on 12 μ .

Obteniendo un total de pérdida de 0,175 bar lo que equivale a 17,5 kPa. Esto se suma con la pérdida de presión obtenida con los otros accesorios lo que nos da un valor de 77,789 kPa lo que es equivalente a 0,77789 bar. Para evitar sobrecarga del sistema debido al particulado que quede atascado, se recomienda poder tener como mínimo una presión de trabajo de 10 bar lo que permitirán dar un tiempo adecuado de reacción para poder cambiar las mallas de los filtros cumpliendo también con las presiones recomendadas en la tabla 4.2.

Luego de determinar las pérdidas, se necesita dimensionar el tamaño del motor eléctrico el cual hará funcionar la bomba. Para ello, se utiliza la siguiente expresión.

$$\dot{W}_{bba} = Q_{nominal} \cdot \Delta P_{sistema} \quad (13)$$

La cual, al reemplazar con el caudal nominal a 1450 rpm equivalente a 0,00034 m³/s y con una presión de 10 bar lo que equivale a 1000 kPa nos da una potencia de la bomba 0,34 kW. Como en el mercado se puede obtener motores eléctricos de 0,372 kW o 0,5 hp, se sugiere seleccionar como mínimo este tamaño de motor para el correcto funcionamiento de la bomba.

Se realiza el mismo procedimiento para el cálculo de las otras bombas en donde, para la bomba 3, el fluido que se va a movilizar corresponde a glicerol con Biodiesel, mientras que la bomba 4 solo moviliza Biodiesel.

Tabla 4.8: Cañerías y accesorios sector 2.

Sector 2						
	Succión			Descarga		
Largo de cañería [m]	2,1			2,2		
Diámetro SHC 40[mm]	20,9			15,8		
Accesorios	Tipo	Le/D	Cantidad	Tipo	Le/D	Cantidad
	Válvula de corte	45	1	Válvula de corte	45	1
	Tee	20	1	Codo 90°	30	1
	Codo 90°	30	1	Conexión a Bomba	10	1
	Codo 45°	16	1			
	Conexión a Bomba	10	1			

Tabla 4.9: Cañerías y accesorios sector 3.

Sector 3						
	Succión			Descarga		
Largo de cañería [m]	1,7			3,2		
Diámetro SHC 40[mm]	20,9			15,8		
Accesorios	Tipo	Le/D	Cantidad	Tipo	Le/D	Cantidad
	Válvula de corte	45	1	Válvula de corte	45	1
	Tee	20	1	Codo 90°	30	2
	Codo 90°	30	2	Conexión a Bomba	10	1
	Conexión a Bomba	10	1			

Tabla 4.10: Cañerías y accesorios sector 4.

Sector 4						
	Succión			Descarga		
Largo de cañería [m]	2,1			3,2		
Diámetro SHC 40[mm]	20,9			15,8		
Accesorios	Tipo	Le/D	Cantidad	Tipo	Le/D	Cantidad
	Válvula de corte	45	1	Válvula de corte	45	1
	Tee	20	1	Codo 90°	30	2
	Codo 90°	30	2	Conexión a Bomba	10	1
	Codo 45°	16	2			
	Conexión a Bomba	10	1			

En los cálculos realizados, para el sector 3 se realizar un estimativo de la viscosidad realizando un promedio entre las ponderaciones de esta. La viscosidad promedio para Biodiesel a 20°C se puede considerar entre un rango de 6,5 a 9 mm²/s [19] mientras que, para el glicerol, la viscosidad cinemática promedio corresponde a 736 mm²/s [9]. Sabiendo también que la mezcla de Biodiesel y glicerol se encuentre en una proporción de 9:1 la viscosidad cinemática para la mezcla se puede determinar como se muestra a continuación:

$$v_{prom} = 0,9 \cdot v_{Biodiesel} + 0,1 \cdot v_{Glicerol} = 83,5 \text{ mm}^2/\text{s} \quad (14)$$

Además, en el sector 4, se obtiene valores para el numero de Reynold mayores a 2300 por lo que se debe calcular el factor de fricción con la siguiente expresión para flujos turbulentos. [9]

$$f = \frac{0,25}{[\log(\frac{1}{3,7(D/\varepsilon)} + \frac{5,74}{Re^{0,9}})]^2} \quad (15)$$

En donde ε corresponde a la rugosidad para el acero inoxidable $4,5 \times 10^{-5} \text{ m}$ [9] y D corresponde al diámetro de la cañería.

Tabla 4.11: Memoria de cálculo.

Sector 2							
Re_{succ.}	Re_{desc.}	F_{succ.}	f_{desc.}	h_{l succ.} [m]	h_{l desc.} [m]	h_{l total} [m]	Presión [Pa]
465,565	615,842	0,137	0,104	1,524	3,572	5,096	45391,117
Sector 3							
Re_{succ.}	Re_{desc.}	F_{succ.}	f_{desc.}	h_{l succ.} [m]	h_{l desc.} [m]	h_{l total} [m]	Presión [Pa]
248,060	328,130	0,258	0,195	2,794	6,703	9,498	85932,403
Sector 4							
Re_{succ.}	Re_{desc.}	F_{succ.}	f_{desc.}	h_{l succ.} [m]	h_{l desc.} [m]	h_{l total} [m]	Presión [Pa]
2589,12	3424,85	0,02	0,03	0,33	1,03	1,36	11887,07

Para evitar sobrecargas en el sistema debido a la acumulación de residuos orgánicos y como las perdidas por presión son relativamente bajas, se opta por implementar una variación de presión a vencer de 10 bar, lo que equivale a 1000 kPa. Esto permite seleccionar un motor de 0,5 hp para la bomba como se calculó con la ecuación (13).

Capítulo 5. Análisis económico de la propuesta.

5.1 Inversión inicial.

Considerando los cálculos realizados en la sección 4, se procede a realizar una evaluación económica del proyecto.

En la tabla 5.1, se puede apreciar un listado de equipos y materiales con la cantidad y los costos de estos. Los valores obtenidos son resultado de cotizaciones realizadas a distribuidores locales y su referencia se indica al lado del nombre del equipo o material en la columna 1.

Tabla 5.1: Listado de equipos y precios

Equipo	Cantidad	Precio	Total
Bomba engranaje [18]	5	\$ 241.762	\$1.208.810
Motor eléctrico con campana y machón [18]	5	\$ 359.377	\$1.796.885
Cañerías Acero inoxidable 1'¼ [15]	2	\$ 113.400	\$ 226.800
Cañerías Acero inoxidable 1' [15]	3	\$ 138.000	\$ 414.000
Filtro [14]	3	\$ 60.000	\$ 180.000
Tee 1' ¼ [14]	2	\$ 5.400	\$ 10.800
Codo 45° 1' [14]	1	\$ 3.100	\$ 3.100
Codo 90° 1' [14]	6	\$ 3.500	\$ 21.000
Codo 45° 1' ¼ [14]	3	\$ 3.500	\$ 10.500
Codo 90° 1' ¼ [14]	8	\$ 2.990	\$ 23.920
Válvula de corte 1' [14]	4	\$ 14.725	\$ 58.900
Válvula de corte 1' ¼ [14]	7	\$ 25.600	\$ 179.200
Abrazaderas para riel 1' ¼ [20]	1	\$ 9.990	\$ 9.990
Abrazadera para riel 1' [21]	1	\$ 8.790	\$ 8.790
Riel para abrazadera [22]	25	\$ 4.347	\$ 108.675
Costo total			\$4.261.370

5.2 Estimación del valor del Biodiesel.

La Municipalidad de Hualpén tiene por objetivo utilizar el Biodiesel producido para reemplazar el consumo de Diesel de los equipos Municipales. Con esta información, se considera como ingreso al monto ahorrado por la compra de combustible. La Municipalidad estima una producción mensual inicial de 200 litros dada las condiciones de recolección que ellos proponen. por lo que en el año se producirán alrededor de 2400 litro de Biodiesel y, además, dentro de los requerimientos de la Municipalidad, se espera hacer funcionar la planta dos veces por semana. Comparando con el valor actual del combustible y realizando un proyección simple con los datos de la Comisión Nacional De Energía [23], se puede obtener los precios promedios anuales de los combustibles para los años 2024 hasta el 2030 los cuales se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 5.2: Estimación lineal del precio de combustible.

Año	Precio promedio de combustible Diesel [CLP]
2023	1059
2024	1314
2025	1521
2026	1728
2027	1935
2028	2143
2029	2350
2030	2557

Con estos datos se puede generar un horizonte de evaluación de proyecto para 7 años.

5.3 Consumos eléctricos.

Para realizar los cálculos de consumo eléctrico de los equipos, se consideran las siguientes condiciones de trabajo las cuales son entregadas por la Municipalidad. La planta funcionará durante dos veces por semana para poder realizar el ciclo completo de trabajo. Se considera los tiempos de funcionamiento de los equipos según se describen en la sección 3.3. Además, se estimarán los consumos anuales para poder integrarlos en el horizonte de evaluación.

5.4 Bombas:

Para los consumos eléctricos de estos equipos, se considera su potencia eléctrica y además el tiempo de trabajo de cada una. De la sección 3.3 se describe que el tiempo para poder transportar el fluido de cada sector de trabajo corresponde a 25 min por lo que el consumo eléctrico queda expresado por la siguiente ecuación.

$$\text{Consumo} = \text{Potencia} \cdot \text{horas de trabajo} \quad (16)$$

Tabla 5.3: Consumo de las bombas.

Equipo	Consumo por hora [kWh]	Consumo anual [kWh]
Bomba 1	0,155	14,88
Bomba 2	0,155	14,88
Bomba 3	0,155	14,88
Bomba 4	0,155	14,88
Total	0,620	59,52

5.5 Equipos de producción:

Dentro de los equipos principales para la producción de Biodiesel, se encuentra un depósito que cumple la función de lavado y secado de aceite en el cual cada proceso dura 1 hora. También, se tiene el reactor en donde se produce la mezcla de aceite con el metóxido esto en conjunto con un compresor que mantiene la presión del sistema en 2 atm.

Como en cada proceso se tiene una mezcla de dos elementos y estos requieren aumentar su temperatura hasta cierto punto para generar la reacción, se establece la siguiente ecuación para obtener la cantidad de energía necesaria en cada sector.

$$q_{total} = m_{comp.1} \cdot cp_{comp.1} \cdot \Delta T + m_{comp.2} \cdot cp_{comp.2} \cdot \Delta T \quad (17)$$

Como se tiene el tiempo de trabajo para cada sector, se puede obtener la potencia necesaria para el proceso con la siguiente expresión.

$$Potencia = \frac{q_{total}}{tiempo} \quad (18)$$

Luego aplicando la ecuación 16, se puede obtener el consumo de los equipos. Esto queda representado en la tabla 5.4.

Tabla 5.4: Consumo de los procesos principales.

Proceso	ΔT [°C]	q_{total} [kJ]	Potencia [kW]	Consumo anual [kWh]
Lavado de Aceite con agua	55	44532	1,54	148,8
Secado del aceite con agua	95	76817	2,67	255,6
Reactor Aceite con metóxido de sodio	55	22730	0,78	75,7
Compresor	No aplica	No aplica	0,75	72
Total	-	-	5,74	552,1

El sector en donde se instala la planta cuenta con instalación tanto monofásica como trifásica con lo que se hace una estimación con la tarifa industrial única que tiene un valor de 379 \$/kWh [24].

5.6 Gastos operacionales:

Dentro de estos gastos, se considera un jefe de planta, dos recolectores para los depósitos disponibles dentro de la comuna y un operador de la planta.

Tabla 5.5: Costo para los cargos.

Cargo	Cantidad	Sueldo mensual [CLP]
Jefe de planta	1	\$ 1200000
Recolector	2	\$ 700000
Operador de planta	1	\$ 750000

5.7 Flujo de caja.

A partir de los estimativos realizados, se puede hacer un análisis de flujo de caja en donde se consideran los gastos fijos, variables, impuestos y tasas para poder verificar la viabilidad del proyecto. Esto queda representado en la tabla 5.6.

Tabla 5.6: Flujo de caja.

Año	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Precio promedio del Biodiesel		\$ 1.314	\$ 1.521	\$ 1.728	\$ 1.935	\$ 2.143	\$ 2.350	\$ 2.557
Producción [L]		2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
(+) Ingreso		\$ 3.153.600	\$ 3.650.400	\$ 4.147.200	\$ 4.644.000	\$ 5.143.200	\$ 5.639.520	\$ 6.136.800
(-) Costos Variables		\$ -209.246	\$ -209.246	\$ -209.246	\$ -209.246	\$ -209.246	\$ -209.246	\$ -209.246
(-) Costos Fijos		\$-3.350.000	\$-3.350.000	\$-3.350.000	\$-3.350.000	\$-3.350.000	\$-3.350.000	\$-3.350.000
(=) Resultado antes de impuestos		\$ -405.646	\$ 91.154	\$ 587.954	\$ 1.084.754	\$ 1.583.954	\$ 2.080.274	\$ 2.577.554
(-) Impuesto		0	\$ 11.440	\$ 73.788	\$ 136.137	\$ 198.786	\$ 261.074	\$ 323.483
Resultado después de impuesto		\$ -405.646	\$ 79.714	\$ 514.166	\$ 948.617	\$ 1.385.168	\$ 1.819.200	\$ 2.254.071
(-) Inversión inicial	\$ -4.261.370							
(=) Flujo de caja	\$ -4.261.370	\$ -405.646	\$ 79.714	\$ 514.166	\$ 948.617	\$ 1.385.168	\$ 1.819.200	\$ 2.254.071
Flujo acumulado	\$ -4.261.370	\$-4.667.016	\$-4.587.302	\$-4.073.136	\$-3.124.518	\$-1.739.350	\$ 79.849	\$ 2.333.920

Además, en la tabla 5.7, se puede apreciar el valor actual neto y la tasa interna de retorno del proyecto considerado una tasa de descuento del 10%.

Tabla 5.7: Indicadores económicos del proyecto.

Año	5	6	7
Tasa de descuento	10%	10%	10%
VAN	\$-2.669.960	\$-1.643.069	\$-486.375
TIR	-11%	0%	8%

Esto indica que, en el año 5, el Valor Actual Neto es negativo lo que sugiere que el proyecto no es rentable a una tasa de descuento del 10%. Además, la Tasa Interna de Retorno es del -11%, lo que significa que la rentabilidad del proyecto en este año es inferior al costo de capital.

En el año 6 y 7 a pesar de que el VAN es negativo, la TIR es del 0% y 8% respectivamente, lo que sugiere que en este punto el proyecto comienza a generar un rendimiento igual al costo de capital y empieza a generar rentabilidad del proyecto.

Capítulo 6. Conclusiones.

En la actualidad, la transformación del aceite de cocina usado en biodiesel ha emergido como una práctica crucial en la búsqueda de soluciones sostenibles para los desafíos ambientales y energéticos. Esta transformación se ha convertido en un proceso fundamental para mitigar el impacto negativo de los desechos de aceite de cocina en el medio ambiente y para promover el desarrollo de fuentes de energía renovable.

En relación con los objetivos descritos, se pudo proponer el rediseño de la planta de Biodiesel de la Municipalidad de Hualpén, donde se recolectó información técnica y se realizaron visitas a terreno para ejecutar inspecciones de los equipos. Esto permitió obtener un bosquejo general de cómo funciona el proceso. La falta de equipos y accesorios limitó la realización de pruebas adecuadas para verificar su funcionamiento. Por ejemplo, la bomba no pudo ser probada debido a la falta de un cable de conexión eléctrica. En futuros estudios, con la planta establecida, se podría investigar la agregar sistemas de automatización como PLC, sensores u otros elementos que faciliten el operar la planta.

Los resultados de la investigación indican que el uso de una bomba centrífuga durante los procesos de la planta emulsiona el aceite de cocina debido a sus altas revoluciones, lo que afecta la reacción química. Reemplazarla por una bomba de desplazamiento positivo con bajo caudal soluciona este problema, y al agregar más bombas según la sectorización propuesta, se evita la contaminación cruzada generada por la bomba centrífuga al completar las distintas etapas de producción de Biodiesel.

En relación con la propuesta económica, los estudios no revelan una rentabilidad inicial, pero, esta se incrementa progresivamente a lo largo del tiempo. Es en el séptimo año donde la rentabilidad alcanza su punto más favorable, con una TIR positiva del 8%. Este resultado indica que, al extender el análisis a un período más amplio, la rentabilidad del proyecto se ve potenciada. Se sugiere a la Municipalidad considerar la ampliación de la producción de la planta mediante la creación de más puntos de recolección de aceite usado, dado que la capacidad máxima diaria de producción de Biodiesel es de 380 litros, considerablemente superior a los 200 litros mensuales establecidos por el Municipio. Esta expansión brinda oportunidades para explorar la comercialización de biocombustibles y/o la generación de energía eléctrica por medio de grupos electrógenos.

Referencias.

- [1] Çengel, Y., Boles, M. 2009. *Termodinámica*. McGraw Hill, Séptima edición.
- [2] *Biocombustibles de primera, segunda y tercera generación: ¿Qué son? ¿Cómo contribuyen a reducir emisiones?* (s. f.). AOP.es. <https://www.aop.es/blog/2021/06/03/biocombustibles-de-primera-segunda-y-tercera-generacion-que-son-como-contribuyen-a-reducir-emisiones/>
- [3] Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos. (2022, 24 noviembre). AOP - Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos. AOP. <https://www.aop.es/>
- [4] Atabani, A., Silitonga, A., Badruddin, I. A., Mahlia, T., Masjuki, H., & Mekhilef, S. (2012). A comprehensive review on Biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2070–2093. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.003>
- [5] León, J. G., Gasparini, R., Rodríguez, M. E., Huarte, G. J., Estrada, J., & Filgueiras, E. (2009). *Manual de Biocombustibles* (1.ª ed.).
- [6] Van Gerpen, J., Shanks, B., Pruszko, R., Clements, D., & Knothe, G. (2022). *Biodiesel Production Technology*. National Renewable Energy Laboratory. Recuperado de www.nrel.gov
- [7] HERVÉ LAMOUREUX, J. (2007). *DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE BIODIESEL* (Ingeniero Civil Mecánico). Universidad de Chile.
- [8] Nicolás, A. S. (2002). *Oleohidráulica*.
- [9] Robert L., M. (2015). *Mecánica De Fluidos - 7a Edición* (7.a ed.). Pearson Educación.
- [10] Sistemas, A. Y. (2017, 10 julio). *Construcción de una bomba de engranes*. Aceros y Sistemas Hidráulicos de México S. A. de C. V. <https://www.ashm.mx/blog/construccion-de-una-bomba-de-engranes/>
- [11] Correa, K.A., & Jaramillo, J.S. (2018). *Análisis en laboratorio de la eficiencia de diferentes tipos de filtros para un suelo limo arcilloso de la ciudad de Cuenca*.

[12] Soto, M.A., Cervera, V.J., Cervera, C.M., & Sancho, H. (2019). *Pilotaje a escala industrial de diferentes tecnologías basadas en membranas de ultrafiltración para el tratamiento de agua potable.*

[13] Cantú, L., & Eli, C. (2015). *Análisis estructural de un filtro de aceite sellado mediante el método de elemento finito.*

[14] EXIMTEC: Filtros / Filtros Spin-On. (s. f.). <http://www.eximtecl.cl/oleohidraulica/filtros/12.php>

[15] CAÑERIAS INOXIDABLES AISI 304L SIN COSTURA. (s. f.). <https://oteroindustrial.cl/canerias-inoxidables-aisi-304l-sin-costura-c-2.html>

[16] Suzihaque, M., Alwi, H., Kalthum Ibrahim, U., Abdullah, S., & Haron, N. (2022). *Biodiesel production from waste cooking oil: A brief review. Materials Today: Proceedings, 63, S490-S495.* <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.527>

[17] *Manual básico de oleohidráulica (2° edición).* (2005). Sohipren S.A.

[18] Hidraservice SpA. (2021, 21 mayo). *Componentes oleohidráulicos - Hidraservice. Hidraservice -Mangueras Industriales, Hidráulicas, Riego y Reparación Oleohidráulicos.* <https://hidraservice.cl/componentes-hidraulicos/componentes-oleohidraulicos/>

[19] Lafont, J. J., Páez, M. J., & Torres, Y. C. (2011). *Análisis químico de mezclas Biodiesel de aceite de cocina usado y diesel por espectroscopia infrarroja. Información tecnológica, 22(4), 35-42.* <https://doi.org/10.4067/s0718-07642011000400005>

[20] *Abrazadera Para Riel Rc 1.1/4puLG +perno+tuerca Pack 25und.* (s. f.). *Abrazaderas. Recuperado 5 de julio de 2022, de https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-986530956-abrazadera-para-riel-rc-114pulg-pernotuerca-pack-25und-_JM#position=11&search_layout=stack&type=item&tracking_id=6795945f-f022-4149-85a8-0b88e7e69fb5*

[21] *Abrazadera Para Riel Rc 1 PuLG +perno+tuerca Pack 25und.* (s. f.). *Abrazadera. https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-986112671-abrazadera-para-riel-rc-1-pulg-pernotuerca-pack-25und-_JM#position=17&search_layout=stack&type=item&tracking_id=6795945f-f022-4149-85a8-0b88e7e69fb5*

[22] RIEL 19x35mm ELECTROGALVANIZADO 1 MT. (s. f.). Vitel energía. Recuperado 5 de julio de 2022, de <https://www.vitel.cl/riel-19x35mm-electrogalvanizado-1-mt/>

[23] Energia, S. I.-. C. N. (s. f.). Hidrocarburo - Comisión Nacional de Energía. <https://www.cne.cl/estadisticas/hidrocarburo/>

[24] Tarifas de electricidad – SASIPA SPA 2024. (s. f.). <https://www.sasipa.cl/tarifas-electricas/>