

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

Contaminación del lubricante usado de motor

De acuerdo a SIGAUS "sistema de gestión de aceites industriales usados en España". (2018), el lubricante de motor usado es un residuo peligroso, altamente contaminante para aire, suelos y agua, estos generan gases tóxicos al ser quemados, disminuyen la densidad de los suelos y un litro de lubricante usado llega a contaminar 1000 litros de agua.

Según el estudio de efecto de la contaminación del aceite (usado) de motor en las características geotécnicas de las arcillas de la zona urbana del Municipio de Tarija Bolivia y su impacto en la construcción e información obtenida por personas vendedores de lubricantes y mecánicos. Los lubricantes usados se obtienen en cada cambio de lubricante de los autos en los talleres mecánicos y talleres de venta y cambio de lubricantes, los lubricantes usados son almacenados para después ser usados como lubricante para cadenas de motosierra, cadena de motocicleta, cadena de bicicletas, también usado para proteger las maderas de construcción de la humedad, el resto se desecha al drenaje o son dispuestos en el suelo. (Villena, E; Villarroel, A; León, M. 2019).

ECOLUB (Tarija)

Ecolub es una empresa de la ciudad de Tarija fundada en el año 2019 cual se dedica a la recolección de lubricantes y filtros usados obtenidos del mantenimiento de diferentes tipos de moviidades, estos aceites usados son recogidos y acogidos en una planta de procesamiento de regeneración para obtener lubricante base. (ECOLUB, 2022).



Figura i-1. ECOLUB.

Características del lubricante usado de motor en Tarija

Según la planta de regeneración de aceites lubricantes usados para la ciudad de Tarija. (ECOLUB, 2022) Las características del lubricante usado en la ciudad son:

Tabla 1-1. Características (ALU) Tarija

Densidad (kg/L)	0.843
Viscosidad Absoluta (Poise)	3.5
Gravedad API a 60°F (°API)	29.3
Gravedad específica a 15.6 °C	0.88
Viscosidad cinemática a 40 °C (cts)	90.98
Viscosidad cinemática a 100 °C (cts)	11.93
Punto de inflamación (°C)	207
Punto de Incurrimiento (°C)	-25
Agua y sedimentos (% vol.)	0.1
Residuo carbonoso (Ramsbotton %)	1.118
Cenizas (% peso)	0.682
Número de acidez total TAN (mgKOH/g)	4.72
Número de neutralización TBN (mgKOH/g)	4.19
Contaminantes (ppm)	Motor gasolina
cadmio	1.7
romo	9.7
plomo	2.2
zinc	951
Cloro total	3600
PCB's	20.7

Lubricante usado de motor en la ciudad de Tarija

De acuerdo al INE "Instituto Nacional de Estadística." (2020), en el departamento de Tarija en 2020 se registró 118439 vehículos, de los cuales el 69,94% pertenece la ciudad de Tarija.

Los automóviles realizan el cambio de lubricante cada 3 y/o 5 meses, y/o lo realizan cada 3000 kilómetros de recorrido usando lubricantes nacionales y 5000 kilómetros de recorrido usando lubricantes importados del exterior del país. La cantidad de volumen para cada cambio de aceite de un vehículo es en promedio el doble de la cilindrada del motor, un promedio del 20% del lubricante se quema debido a las altas temperaturas en la lubricación de los pistones en el motor, también el lubricante se usa para refrigerar el motor. (Encuesta a personal de trabajo de taller de cambio de lubricantes para vehículos, 2021).

De acuerdo al Ministerio de medio ambiente y agua. (2011), se estima que por cada periodo de mantenimiento de un vehículo se genera 4.9 litros de lubricante usado.



Figura i-2. Contaminación del lubricante usado

Reciclado de lubricante de motor usado en Bolivia

En Bolivia existen empresas (Santa Cruz, La Paz, Tarija y Cochabamba) cuales reciclan el lubricante por tratamientos para obtener aceite de base, luego pasan a mejorar la viscosidad y nuevamente empaquetado en tampones, baldes y bidones para ser distribuidos a los mercados. (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2017).

Actualmente en la ciudad de Tarija cuenta con una planta de reciclado de lubricante motor para obtener aceite base. El reciclaje de aceite usado de automóviles es una opción ambiental para amortiguar la contaminación producida por el lubricante usado de motor.

Obtención de combustible a partir de lubricante usado de motor

El proceso para obtener combustible a partir de aceite usado se basa en el proyecto de grado de Brenda Aguirre Ortega. (2010). Obtención de diésel #2 sintético a partir de aceites lubricantes usados [Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniero Químico] (Quito Ecuador) utilizando el craqueo térmico del aceite usado, destilación del producto craqueado y filtración del producto final, obteniendo una conversión del 75% en diésel #2 sintético a partir del lubricante usado. Actualmente en Estados Unidos y regiones de Europa se usa el reciclado de lubricante usado para obtener diésel.

El diésel #2 es un combustible sintético cual debe tener un mínimo 75 % de hidrocarburos saturados de 10 a 15 carbonos y este se usa para combustible en hornos, motores a diésel industriales y generalmente se usa en vehículos agrícolas. Los combustibles diésel están clasificados como diésel número "1", "2" o diésel número 4. El diésel número "2" es utilizado con mayor frecuencia en automóviles agrícolas, hornos y camiones. (Itstillrun, combustibles, 2018).

OBJETIVOS Objetivo general

Diseñar una planta piloto de reciclado de lubricante usado de motor a gasolina para su uso como combustible, ampliando la planta de regeneración de lubricantes (ECOLUB) de la ciudad de Tarija.

Objetivos específicos

- Caracterizar en cantidad los lubricantes usados de automóviles de motor a gasolina en función del parque automotor de la ciudad de Tarija.
- Describir el proceso para tratamiento de aceites lubricantes usados y su acondicionamiento para uso como combustible de vehículos.
- Diseñar una planta piloto de obtención de combustible a partir de aceite lubricante usado.
- Describir el producto obtenido y compararlo con otros combustibles similares del mercado.
- Realizar el estudio económico del proyecto, mediante el cual se analice el grado de rentabilidad del presente proyecto.

JUSTIFICACIÓN

Justificación técnica

El presente proyecto de investigación es una herramienta de ingeniería el cual contiene un estudio técnico (diseño de la planta) y un análisis económico del mismo, para la implementación de un método para la obtención de diésel a partir de lubricante usado de vehículos de motor a gasolina mediante el craqueo térmico, recuperando los lubricantes usados que son desechados en la ciudad de Tarija.

Justificación ambiental

El proceso utilizado en el presente proyecto coadyuva a la revalorización de desechos, mediante el reciclado, acondicionamiento y disminución de residuos de lubricantes usados de motor que son contaminantes y tóxicos para el suelo tierra y agua de la ciudad de Tarija, mediante la transformación de residuo peligroso a combustible.

Justificación social

Con el desarrollo del presente proyecto se pretende iniciar la cadena para que posteriormente se logre:

- Ampliar la planta de regeneración de lubricantes ECOLUB de la ciudad de Tarija.
- Reducir los efectos contaminantes al suelo tierra y agua generados por los lubricantes usados de motor a la ciudad de Tarija.
- Reducir los efectos dañinos a la salud de seres vivos generados por los lubricantes usados mal acondicionados a la sociedad.

Justificación económica

Con la ampliación que se diseña en el presente proyecto, se pretende incrementar el valor agregado a los lubricantes usados de motores a gasolina a través de reciclado y reuso para obtener combustible y venderla al mercado, recuperando los lubricantes usados que son desechados.

CAPÍTULO I

1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

1.1. Materias primas

La planta de reciclado de lubricantes y filtros usados de Tarija usa como materia prima el aceite lubricante usado de motor de los automóviles y maquinaria industrial, estos son procedentes de los talleres mecánicos, constructoras en la ciudad de Tarija, estos residuos son clasificados y reciclados para su respectiva venta. (ECOLUB, 2022).

El lubricante usado es todo aceite lubricante, de motor, de transmisión o hidráulico con base mineral o sintética de desecho que, por efectos de su utilización, se haya vuelto inadecuado para el uso asignado inicialmente. (Aguirre, B. 2010)

1.2. Localización de la planta

Actualmente la planta de reciclado se encuentra en la zona de Florida ciudad de Tarija, av. Circunvalación entre Mejillones y Camargo, Departamento de Tarija, país Bolivia. (Google maps. 2021)



Figura 1-1. Ubicación de la planta

1.3. Distribución de la planta

Actualmente la planta de reciclado es administrada por ECOLUB de la ciudad de Tarija. La planta está dividida en 4 áreas (recepción, proceso, almacenamiento. Administración) (ECOLUB, 2022).

1.3.1. Área de recepción

Es el área donde se almacena los residuos del lubricante que son transportados desde los diferentes talleres de la ciudad de Tarija.

1.3.2. Área de proceso

Área donde se analiza los lubricantes usados y se realiza el proceso de regeneración de aceite base.

1.3.3. Área de administración

Área donde se controla, gestiona y se tramita las diferentes documentaciones de la planta.

1.4. Servicios auxiliares

Actualmente la planta no cuenta con servicios auxiliares debido a que la materia prima es recogida por la misma empresa, mediante un camión que recorre los diferentes talleres de la ciudad de Tarija.

1.5. Manejo de materiales

Los materiales manejados son los residuos de lubricantes usados que son procedentes de la ciudad de Tarija recogidos por la misma empresa (ECOLUB) mediante un camión de carga, que recolecta cada día el lubricante usado, estos materiales y los insumos para el proceso son manejados con equipo de protección personal para los trabajadores.

1.6. Operación y control

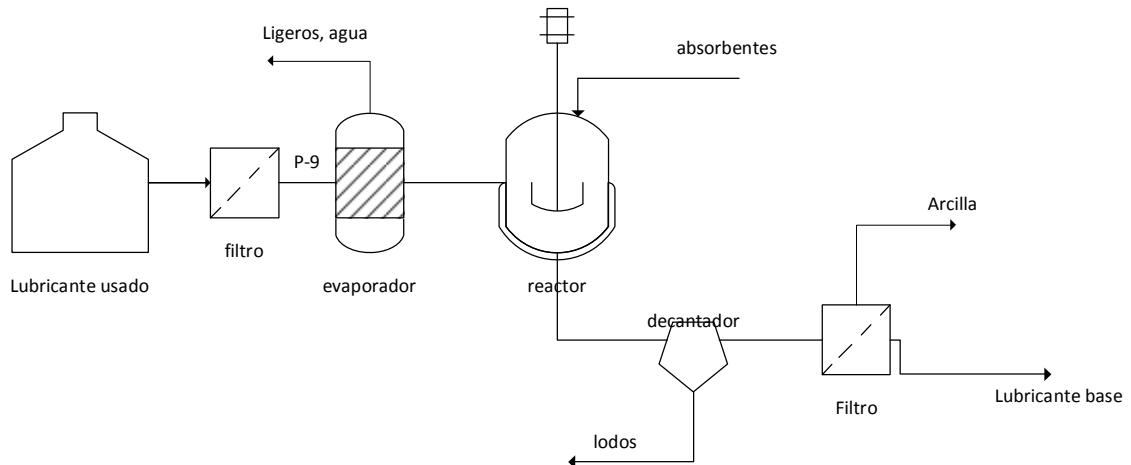


Figura 1-2. Diagrama de recuperación

El lubricante usado es filtrado para eliminar los metales y tierra, después se pasa a un evaporador hasta los 230 °C para eliminar agua y componentes ligeros después se pasa al reactor a la misma temperatura se introduce la arcilla para su absorción complida su absorción se lo disuelve con kerosene y se procede a decantar a 150 °C y al final se pasa por un filtro a 100 °C para obtener lubricante base.

Actualmente ECOLUB es una empresa independiente que opera solo en la ciudad de Tarija, tiene una capacidad máxima para procesar 4000 litros de lubricante usado mediante el proceso de absorción por día de todo tipo de automóvil, talleres, industrias y constructoras, cumple con las respectivas normas ambientales de uso y tratamiento de lubricantes usados. (ECOLUB,2022).

1.7. Eliminación de efluentes

Los efluentes más comunes son los restos de los residuos que son clasificados entre ellos los aceites que sobrepasan los 50 ppm de PCBs, cuales son tóxicos para su reusó, estos son residuos que no tiene ningún valor o no pueden ser reciclados, estos residuos junto a los hidrocarburos livianos son almacenados en la planta para su posterior acopio. (ECOLUB, 2022)

CAPÍTULO II

2. CONCEPCION Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

2.1. Identificación del problema

El aceite lubricante usado es un gran agente contaminante, tóxico no solo para humanos sino también para animales y plantas, sin embargo, actualmente empresas como ECOLUB, se encuentran innovando procesos para el acopiado y acondicionamiento de aceites lubricantes usados. Sin embargo, actualmente requiere ampliar su proceso a través del cual se valore aún más esta materia prima. En este sentido el problema es el siguiente:

¿Cuál es el proceso mediante el cual se genera una valorización energética del aceite usado de motor que sea técnicamente viable y económicamente factible para la empresa ECOLUB?

2.2. Descripción de alternativas técnicas de solución

Existen 2 alternativas de solución para reciclar el lubricante usado de vehículos que son la recuperación del lubricante y la valoración energética del lubricante (Minaambiente, 2014).

- **Regeneración del lubricante usado.** - Es la recuperación del aceite lubricante con sus propiedades originales o a un lubricante base para poder ser de nuevo usado, eliminando casi todos los contaminantes que contiene el aceite usado.
- **Valorización energética del lubricante usado.** - Es el proceso de recuperar el valor remanente o el poder calorífico de los materiales que componen los residuos o desechos peligrosos, mediante procesos de tratamiento físicos y químicos del aceite usado.

2.3. Selección de la alternativa de solución de acuerdo a criterios apropiados

ECOLUB Tarija ya realiza la regeneración de lubricante usado y se plantea ampliar el reciclado del lubricante para obtener combustible diésel, esto debido a que para el proceso de conversión a diésel es suficiente que el lubricante usado sea de motor a gasolina y el PCB's (bifenilos policlorados) no supere los 50 ppm, además de también reducir la importación de diésel en Bolivia. (Elaboración propia, 2021).

2.4. Definición de condiciones y capacidad

Se plantea ampliar la planta de reciclado de lubricantes la ciudad de Tarija mediante un área de conversión de lubricante usado a diésel.

De acuerdo al INE en 2020 para la ciudad de Tarija existe 82836 vehículos. Tarija cuenta con un 6 % en crecimiento del parque automotor (3% en la pandemia).

(Elaboración propia, 2021).

$$ALU/mes = \frac{\text{vehículos} * ALU \text{ generado por auto}}{\text{periodo de cambio}} \quad (\text{Ec. 2-1})$$

Vehículos = 82836 autos

ALU generado por auto = 4,9litros/auto

Periodo de cambio = 4 meses

$$ALU/mes = \frac{82836 \text{ autos} * 4,9 \text{ litros/auto}}{4 \text{ meses}}$$

$$ALU/mes = 101474 \text{ litros}$$

$$ALU/dia = 3382 \text{ litros}$$

Tabla II-1. Proyección de generación (ALU) ciudad de Tarija

Año	Vehículos Tarija	ALU l/mes	ALU l/día
2020	82836	101474	3382
2021	85321	104519	3484
2022	90441	110790	3693
2023	95867	117437	3915
2024	101619	124483	4149
2025	107716	131952	4398
2026	114179	139869	4662
2027	121030	148262	4942
2028	128292	157157	5239
2029	135989	166587	5553
2030	144149	176582	5886
2031	152797	187177	6239
2032	161965	198408	6614
2033	171683	210312	7010

Fuente: elaboración propia, (2022).

La capacidad máxima de la planta ECOLUB es de 4000 litros/día se plantea destinar el 60% para el proceso de regeneración a lubricante base y el 40% para la valorización del lubricante usado para su conversión en diésel. Se plantea iniciar el proyecto en el año 2023 con una proyección de hasta 2033. Según un promedio en base al tipo de auto y consumo de diésel de los vehículos en la ciudad de Tarija el 84,6 % es de motor a gasolina. (INE, 2020).

Tabla II-2. Proyección de generación (ALU) Tarija.

Año	ALU gasolina l/día	ALU gasolina l/día (40%)	ALU gasolina kg/d (40%)	ALU gasolina kg/h (40%)
2023	3312	1325	1117	140
2024	3510	1404	1184	148
2025	3721	1488	1254	157
2026	3944	1578	1330	166
2027	4181	1672	1409	176
2028	4432	1773	1495	187
2029	4698	1879	1584	198
2030	4980	1992	1679	210
2031	5278	2111	1780	222
2032	5595	2238	1887	236
2033	5931	2372	2000	250

Fuente: elaboración propia, (2022).

El proceso de valorización tendrá una capacidad máxima requerida de 296,5 litros por hora (250kg/h). (Elaboración propia,2022).

2.5. Selección del o los equipos necesarios

Para el proceso de craqueo térmico se requiere de los siguientes equipos:

Tabla II-3. Equipos necesarios

Equipo	Cantidad	Función
Tanque de almacenamiento	4	Almacenar el lubricante usado, diésel, hidrocarburos livianos y desechos
Reactor de craqueo térmico	1	degradar las cadenas de hidrocarburos
Columna de separación	1	Separar los hidrocarburos livianos y diésel.
Filtro	1	Filtrar el diésel de las partículas
Bombas	2	Transportar los diferentes fluidos
Condensador	1	Condensar los hidrocarburos livianos
Intercambiador de calor	2	Enfriar los líquidos

Fuente: elaboración propia, 2022.

CAPÍTULO III

3. ESPECIFICACIÓN Y DISEÑO DEL EQUIPO

3.1. Diagramas de flujo incluyendo la alternativa de solución

El proceso de valorización del aceite es aparte del proceso de regeneración que ya está instalado, estando en otra área diferente, esto para no afectar el proceso. Debido a que la regeneración puede ser con cualquier lubricante usado ya sea de motor diésel, gasolina o industrial. (Elaboración propia, 2022).

Tabla III-1. Especificación de equipos en el diagrama

1	Tanque de almacenamiento del lubricante usado
2	Reactor de craqueo térmico
3	Columna de destilación
4	filtro
5	Recipiente de hidrocarburos livianos
6	Recipiente de diésel N.2

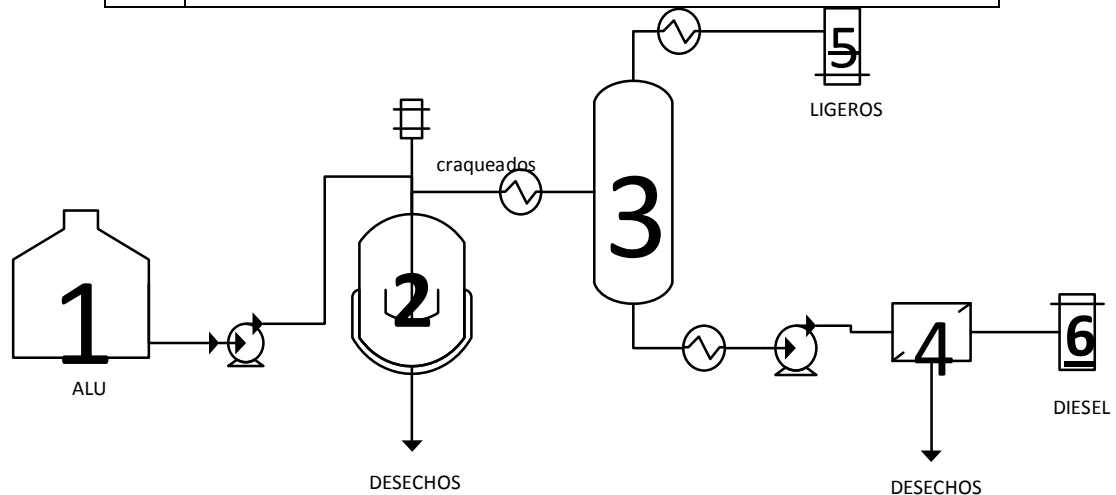


Figura 3-1. Diagrama de valorización.

3.2. Balance de materia y energía

3.2.1. Simulación del proceso

Usando las características del lubricante usado otorgadas por ECOLUB (2022) para poder crear el componente hipotético del aceite usado y los datos de la cinética de reacción para la valorización del aceite usado (Aguirre, B. 2010). Se realiza la simulación en el programa Aspen Hysys V10. Para obtener resultados y realizar los casos de estudio en el reactor y separador para mejorar su optimización técnica como económica.

3.2.1.1. Componente hipotético (ALU)

Se introduce las características del aceite lubricante usado al simulador como su peso molecular, fórmula química, densidad, punto de incurrimiento, punto de inflamación y valores de viscosidad a diferente temperatura. (Elaboración propia, 2022).

The screenshot displays the Aspen Hysys interface. On the left, the 'Component List - 1' window shows a table of components:

Component	Type	Group
n-C13	Pure Component	
1-Dodecene	Pure Component	
1-Pentene	Pure Component	
C30*	User Defined Hypothe...	HypoGroup1
H2O	Pure Component	

The 'Component Identification' dialog box for 'C30*' is open, showing the following details:

- Component Name: C30*
- Family / Class: Hydrocarbon
- Chem Formula: C30H62
- ID Number: 20000
- Group Name: HypoGroup1
- CAS Number: (empty)

The 'UNIFAC Structure' section shows '<<< No Structure Available >>>'. The 'User ID Tags' table is as follows:

ID	Tag Number	Tag Text
1	<empty>	Not Spec'd

Buttons at the bottom include 'Estimate Unknown Props', 'Edit Properties', and 'Edit Visc Curve'.

Figura 3-2. Componente Hysys.

3.2.1.2. Cinética de reacción

El alcano presente en los aceites lubricantes usados y nuevos es el tricontano ($C_{30}H_{62}$) cual es el componente de los lubricantes, para la reacción cinética se introdujeron los datos de la constante $K = 7,703 \times 10^{-3}$ y la entalpia de reacción $\Delta H_R = 86.37 \text{ J/mol}$. (Brenda Aguirre Ortega, 2010).

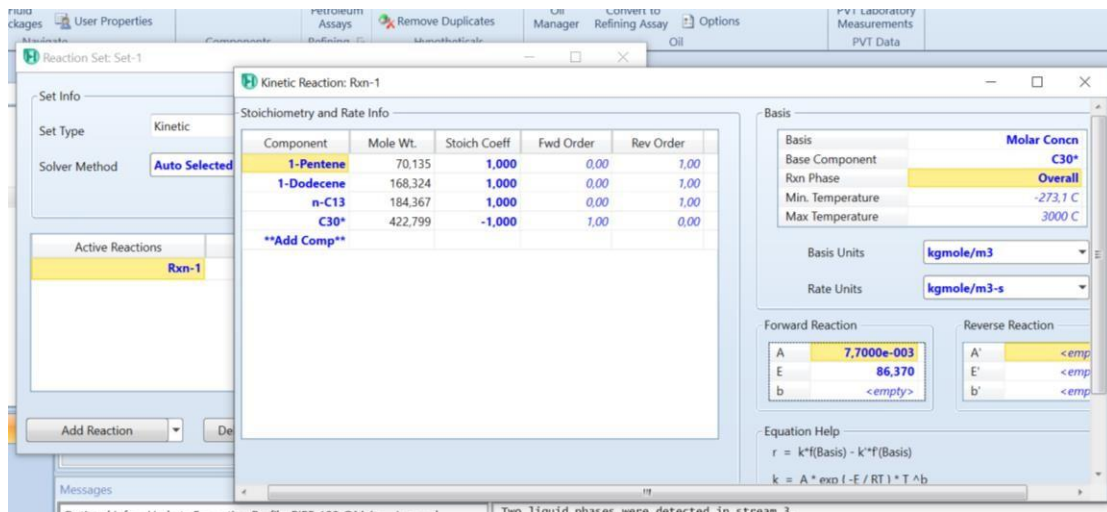
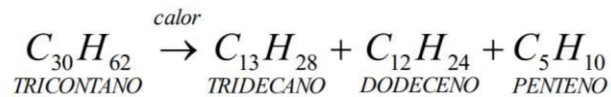


Figura 3-3. Cinética de reacción Hysys.

Fuente: elaboración propia, 2022.

3.2.1.3. Caso de estudio (reactor)

A través de la simulación se pudo verificar en el reactor que a mayor temperatura mayor cantidad de diésel se obtiene, pero el porcentaje de C12 y C13 baja según las normas internacionales y nacionales (Decreto Supremo N.º 2741,2016). El Diesel debe tener un mínimo de 75% en hidrocarburos, para el proceso de reciclado se recomienda un 80% para mejorar su calidad.

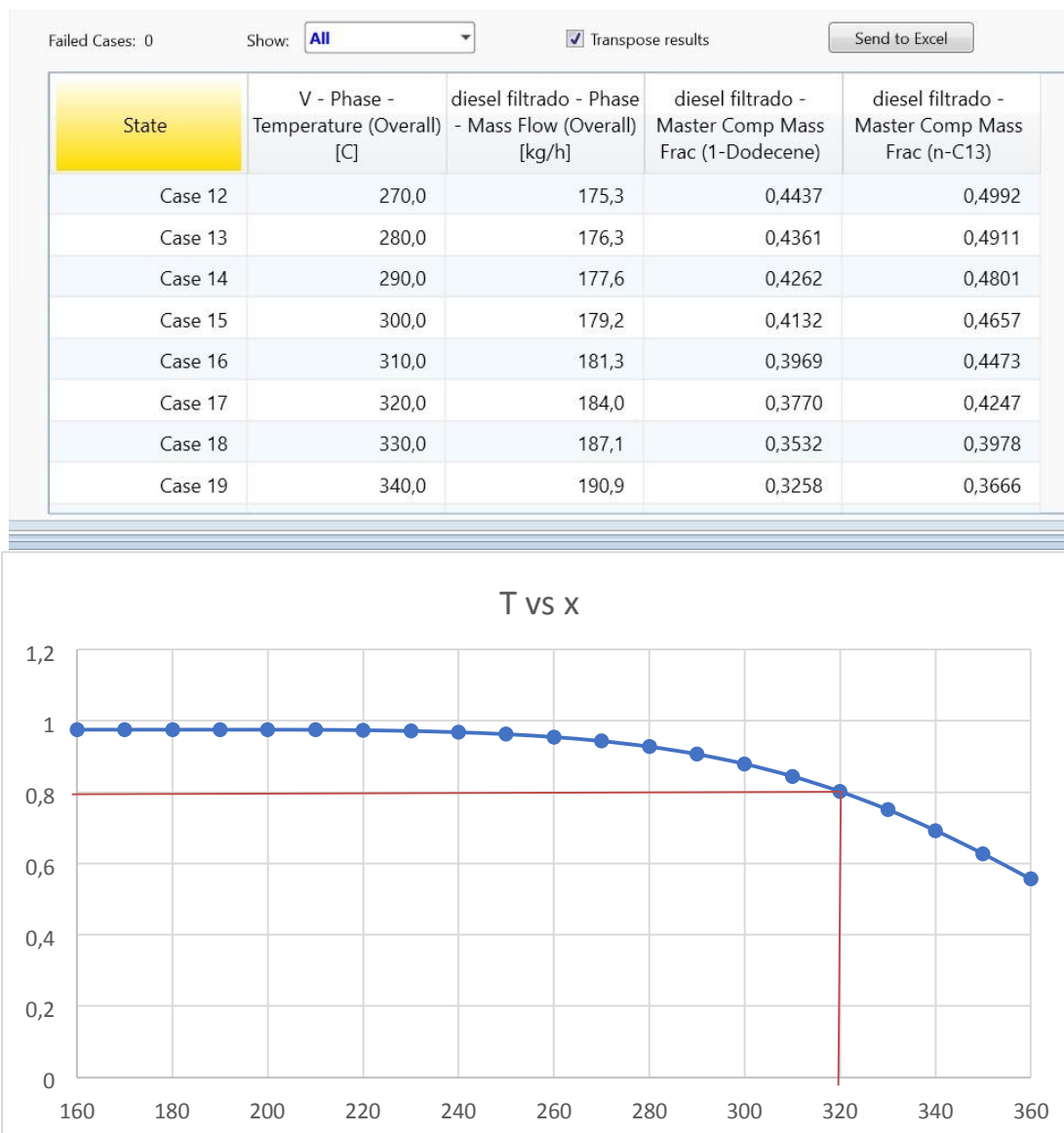


Figura 3-4. Gráfica temperatura vs concentración.

Fuente: elaboración propia, 2022.

En base a la gráfica la temperatura óptima para el reactor es de 320 °C para obtener un 80% en hidrocarburos de diésel. (Elaboración propia, 2022).

3.2.1.4. Simulación final del proceso

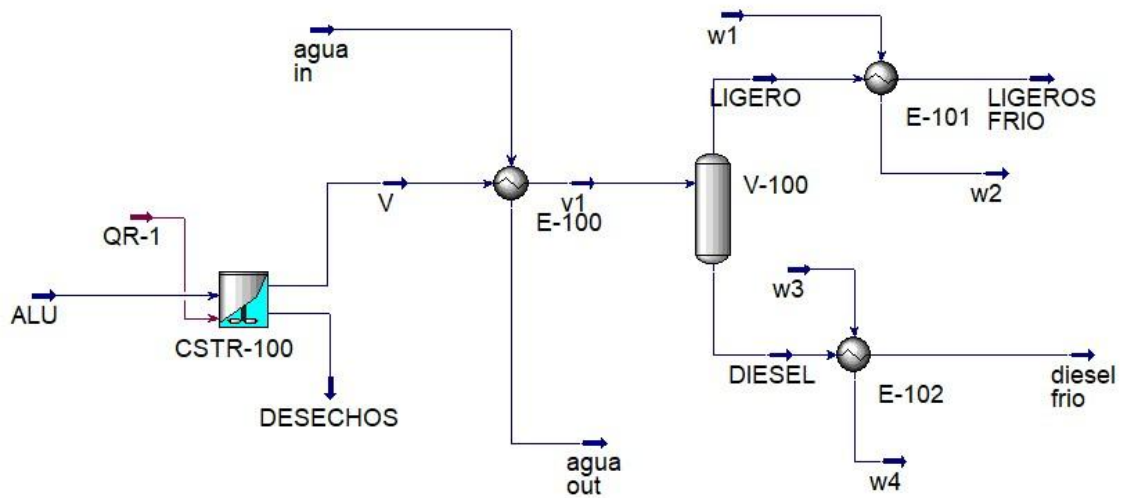


Figura 3-5. Simulación final.

Los resultados en la simulación son una eficiencia global del 82 %, el reactor se maneja a una temperatura de 320 °C cual tiene una eficiencia del 84 %, la temperatura del separador es de 150 °C. (Elaboración propia, 2022).

3.2.2. Balance de materia

Mediante la simulación en hysys y partiendo de la cantidad de entrada 250kg/h (ALU) al proceso, se obtienen los siguientes resultados en rendimiento por año. (Elaboración propia, 2022).

Tabla III-2. Resultados HYSYS

Materia	%	Densidad (kg/m3)
filtro	0,5	-
diésel filtrado	82,5	840,691
Ligeros	15,7	674,836
desechos reactor	1,2	843

3.2.2.1. Balance y proyección general

Tabla III-3. Proyección de cantidades

	ALU	Diesel	Ligeros	Desechos Rx.
Año	m3/año	m3/año	m3/año	m3/año
2023	382	316	76	5
2024	404	335	81	5
2025	429	355	85	5
2026	454	376	90	5
2027	482	398	96	6
2028	511	422	102	6
2029	541	448	108	6
2030	574	475	114	7
2031	608	503	121	7
2032	645	533	128	8
2033	683	565	136	8

Fuente: elaboración propia, 2022.

3.2.2.2. Balance agua y proyección

Mediante la simulación en hysys y partiendo de la cantidad de entrada de lubricante usado al proceso, se obtienen los siguientes resultados para la cantidad de agua necesaria para el separador, condensador de ligeros y enfriador del diésel por año.

(Elaboración propia, 2022).

Tabla III-4 Proyección agua

Año	Separador m3	Cond. m3	Enfriador m3	Total m3
2023	706	135	347	1188
2024	744	143	367	1253
2025	789	151	619	1559
2026	834	160	411	1404
2027	883	169	435	1488
2028	938	180	462	1580
2029	993	190	489	1672
2030	1052	202	519	1772
2031	1111	213	548	1872
2032	1181	226	591	1998
2033	1252	240	616	2107

Fuente: elaboración propia, 2022.

3.2.3. Balance de energía

Mediante la simulación en hysys y partiendo de la cantidad de entrada de lubricante usado al proceso, se obtienen los resultados del requerimiento energético para el reactor, para un trabajo de 8 horas por día. (Elaboración propia, 2022).

Tabla III-5. Proyección energía reactor

Año	Reactor (Mj)
2023	479
2024	506
2025	537
2026	567
2027	601
2028	639
2029	676
2030	717
2031	758
2032	805
2033	853

Fuente: elaboración propia, 2022.

3.3. Diseño y dimensionamiento del o los equipos necesarios

Se diseñará y dimensionará los equipos necesarios para el proceso en base a las capacidades de materia y energía máximas calculadas mediante la simulación de Hysys y las proyecciones obtenidas para el año 2033. (Elaboración propia, 2022).

3.3.1. Tanques de almacenamiento

Se plantea que los tanques de almacenamiento se reabastezcan cada 15 días con un sobredimensionamiento del 20%. (Elaboración proia,2022).

Tabla III-6. Capacidades máximas tanque de almacenamiento

Tanque	Capacidad máxima calculada Litros/15 días	Capacidad sobredimensionada litros
Aceite lubricante usado	28464.16	40000
Diesel	231416	30000
Ligeros	5666	6000
Desechos reactor	2400 (3meses)	2700

Fuente: elaboración propia, 2022.

3.3.2. Equipos

3.3.2.1. Reactor CSTR

Para el diseño del reactor continuo se usará datos obtenidos de cinética de reacción, características del aceite usado en Tarija y resultados obtenidos en la simulación en hysis. (Elaboración propia,2022).

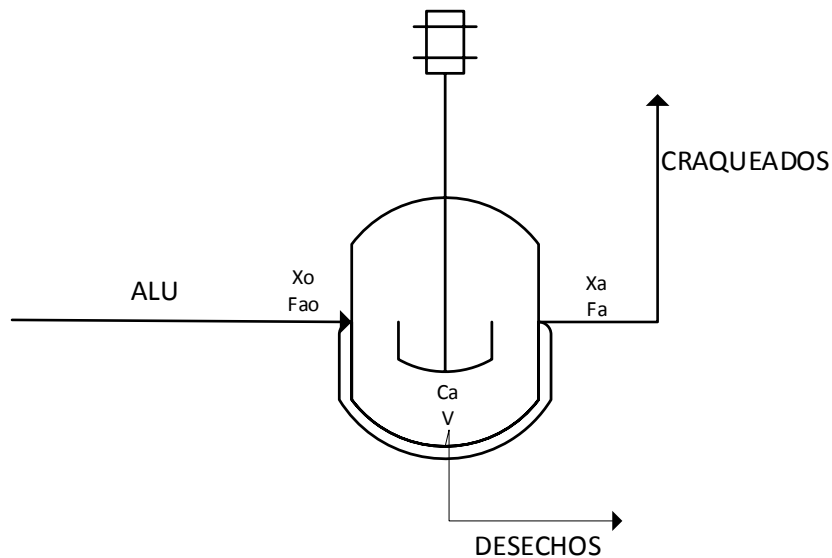


Figura 3-6. Diagrama del reactor CSTR.

$-r_A = 0,0077C_A$ mol/L.min (velocidad de reacción)

$X_A = 0,845$ (conversión de la reacción)

$F_{A0} = 9,865$ mol/min (flujo molar que entrada al reactor)

$C_{A0} = 2.815$ mol/l (concentración a la entrada al reactor)

Usando la ecuación de “diseño de reactor CSTR de Reactores de mezcla completa CSTR” de Ing. Bulmaro Noguera. Tenemos que el volumen del reactor es igual:

$$V = \frac{F_{A0} \cdot X_A}{-r_A} \quad (\text{Ec. 3 - 1})$$

$$V = 1,2 \frac{F_{A0} \cdot X_A}{0,0077 C_A}$$

$$V = \frac{F_{A0} \cdot X_A}{0,0077 C_{A0} (1 - X_A)}$$

$$V = \frac{9,865 \text{ mol/min} * 0,845}{0,0077 \text{ mol/L} \cdot \text{min} * 2,815 \text{ mol/l} * (1 - 0,845)}$$

$$V = 2481.18 \text{ litros}$$

Con un sobredimensionamiento del 20% tendríamos:

$$V = 3 \text{ m}^3$$

Cálculo del diámetro y altura (relación 3:1):

$$D = \sqrt{\frac{V * 4}{\pi * 3}} \quad (\text{Ec. 3-2})$$

$$D = \sqrt{\frac{3 \text{ m}^3 * 4}{\pi * 3}}$$

$$D = 1,12 \text{ m}$$

$$H = 3 * D \quad (\text{Ec. 3-3})$$

$$H = 3 * 1,12 \text{ m}$$

$$H = 3,36 \text{ m}$$

Se requiere un reactor con un volumen de tanque de reacción mayor o igual a 3 metros cúbicos, altura de 3,4 metros, y diámetro de 1,12 metros. (Elaboración propia, 2022).

1.1.1.1. Enfriador de los craqueados

Para el diseño se simuló en aspen hysys un intercambiador de calor tubular, esto debido a que las cantidades son a escala piloto (pequeñas), obteniendo los siguientes resultados para su diseño:

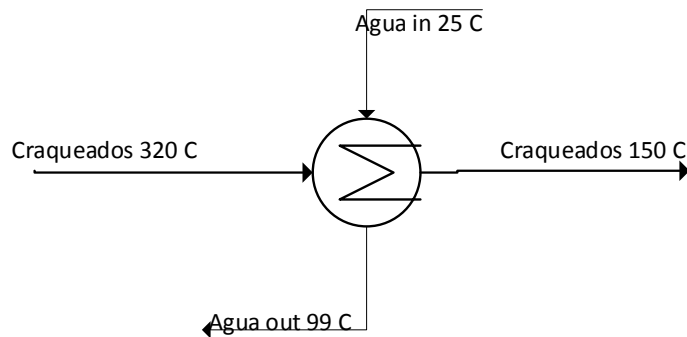


Figura 3-7. Diagrama intercambiador craqueados.

$Q = 45780,53 \text{ W}$ (calor removido)

$\Delta T_m = 125 \text{ }^\circ\text{C}$ (diferencia de temperaturas media logarítmica)

$UA = 271,46 \text{ W/C}$ (coeficiente global por el área)

$M_{\text{H}_2\text{O}} = 543 \text{ l/h}$ (masa de agua necesaria para enfriar)

Dado que los fluidos que participan del intercambio de calor son agua y combustibles, de acuerdo con Incropera y Dewitt, “Fundamentos de transferencia de calor” se utiliza el valor $U = 350 \text{ (W/m}^2\text{}^\circ\text{C)}$, para calcular el área de intercambio.

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad (\text{Ec. 3-4})$$

$$U \cdot A = 271,46907 \text{ W/C} \quad (\text{Ec. 3-5})$$

$$A = \frac{271,46907 \text{ W/C}}{U} \quad (\text{Ec. 3-6})$$

$$A = \frac{271,469W/C}{350W/m^2C}$$

$$A = 0,77 m^2$$

$$A = 0,924 m^2 \text{ (sobredimensión al 20\%)}$$

Cálculo de longitud:

$$A = \pi * Di * L \quad (\text{Ec. 3-7})$$

$$L = \frac{A}{\pi * Di} \quad (\text{Ec. 3-8})$$

$$L = \frac{0,93m^2}{\pi * 0,0254m}$$

$$L = 11,6m$$

Cálculo de número de tubos, la longitud de los tubos otorgada del fabricante en base a el área de enfriamiento es igual a 0,585m, el diámetro interno sugerido de los tubos igual (DN 1plg) 25,4 mm, datos adjuntos en el anexo 1. Especificación de intercambiadores.

$$N_t = \frac{A}{\pi * Di * L} \quad (\text{Ec. 3-9})$$

$$N_t = \frac{0,93 m^2}{\pi * 0,0254m * 0,585m}$$

$$N_t = 20 \text{ tubos.}$$

Conociendo el número de tubos se puede calcular el diámetro de carcasa mediante el anexo 3. Diámetro de carcasa.

$$D_c = 8plg = 0,2032m \text{ configuración triangular.}$$

Se requiere un intercambiador con una capacidad mínima de un área de 0,924 metros cuadrados, diámetro de 0,20 metros, longitud de 0,585 metros y una capacidad de enfriamiento de 543litros por hora de agua. (Elaboración propia, 2022).

1.1.1.2.Separador

Para el diseño del separador bifásico se tomaron en cuenta los datos obtenidos en la simulación de Hysys.

Flujo del fluido gas = 39,2757 kg/h.

Caudal del gas = 0,2752 m³/min.

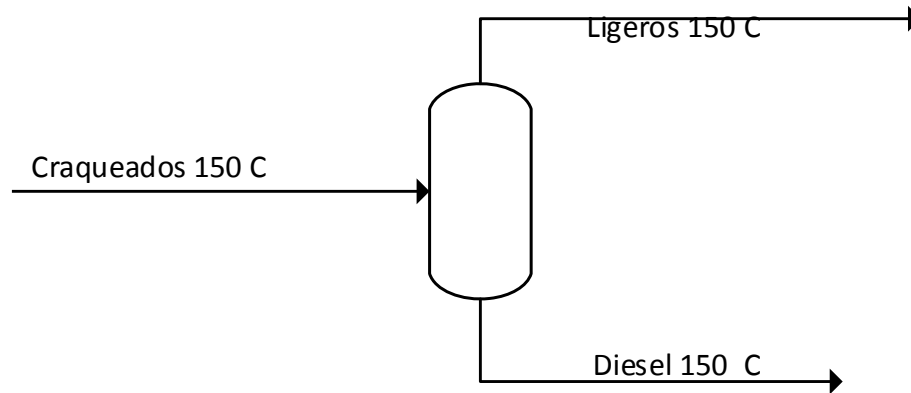


Figura 3-8. Diagrama de separador.

El tiempo de retención dentro del separador, nos dará una pauta para poder obtener el volumen aproximado necesario para el dimensionamiento del separador, según la gravedad específica de los derivados del petróleo. (Arnold K. y Stewart M. (1991).

Para el tricontano la gravedad específica tiene un API DE 30 ° entonces sería un tiempo de retención de 2 minutos, datos adjuntos en el anexo 2. Tiempo de retención.

$$V_{SEP} = CAUDAL * TIEMPO DE RETENCION \quad (Ec. 3-10)$$

$$V_{SEP} = 0,2752m^3/min * 2min$$

$$V_{SEP} = 0,5504$$

$$V_{SEP} = 0,66 m^3 \text{ (sobredimensión al 20\%)}$$

Para el cálculo del diámetro y longitud:

$$L = R \cdot D \quad (\text{Ec. 3-11})$$

Existe un valor adimensional conocida como R, la cual permite dimensionar separadores de manera económica y eficiente; Donde usualmente R toma valores de 1,5 a derivados del petróleo $R = 1,5$. (Arnold K. y Stewart M. (1991).

$$L = 1,5 \sqrt{\frac{4V}{\pi}} \quad (\text{Ec. 3-12})$$

$$L = 1,5 \sqrt{\frac{4(0,66)}{\pi}}$$

$$L = 1,37 \text{ m}$$

Para el cálculo del diámetro:

$$D = \frac{L}{R} \quad (\text{Ec. 3-13})$$

$$D = \frac{1,37}{1,5}$$

$$D = 0.91 \text{ m}$$

Los resultados coinciden con la simulación, y se requiere un separador con una capacidad mínima de un volumen de 0,66 metros cúbicos, longitud de 1,4metros y un diámetro de 0,9 metros. (Elaboración propia, 2022).

1.1.1.3.Enfriadores ligeros

Para el diseño se simuló en aspen hysys un intercambiador de calor tubular, esto debido a que las cantidades son a escala piloto (pequeñas), obteniendo los siguientes resultados para su diseño:

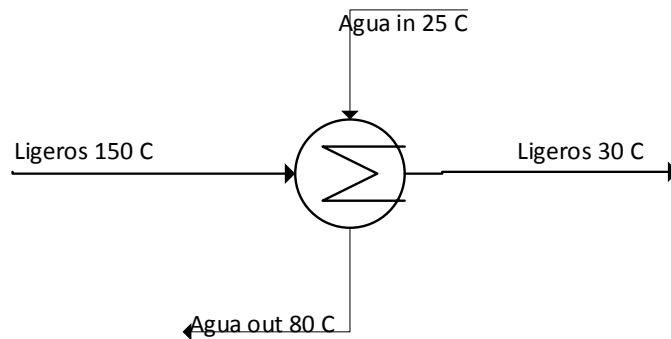


Figura 3-9. Diagrama intercambiador de ligeros.

$Q = 6426,31 \text{ W}$ (calor removido)

$\Delta T_m = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ (diferencia de temperaturas media logarítmica)

$UA = 260 \text{ W/C}$ (coeficiente global por el área)

$M_{\text{H}_2\text{O}} = 104 \text{ l/h}$ (masa de agua necesaria para enfriar)

Dado que los fluidos que participan del intercambio de calor son agua y combustibles, de acuerdo con Incropera y Dewitt, "Fundamentos de transferencia de calor" se utiliza el valor $U = 350 \text{ (W/m}^2\text{ }^\circ\text{C)}$, para calcular el área necesaria para el intercambiador.

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}$$

$$U \cdot A = 69,749 \text{ W/C} \quad (\text{Ec. 3-13})$$

$$A = \frac{260 \text{ W/C}}{U} \quad (\text{Ec. 3-14})$$

$$A = \frac{260 \text{ W/C}}{350}$$

$$A = 0,74 \text{ m}^2$$

$$A = 0,9 \text{ m}^2 \quad (\text{sobredimensión al 20\%})$$

Cálculo de longitud:

$$A = \pi \cdot D \cdot L$$

$$L = \frac{A}{\pi * Di}$$

$$L = \frac{0,9 \text{ m}^2}{\pi * 0,019 \text{ m}}$$

$$L = 15 \text{ m}$$

Cálculo de número de tubos, la longitud de los tubos otorgada del fabricante en base a la capacidad de enfriamiento es igual a 0,585 metros, diámetro interno sugerido de los tubos igual (DN 1plg) 25,4 milímetros, datos adjuntos en el anexo 1. Especificación de intercambiadores.

$$N_t = \frac{A}{\pi * Di * L}$$

$$N_t = \frac{0,9 \text{ m}^2}{\pi * 0,0254 \text{ m} * 0,585 \text{ m}}$$

$$N_t = 20 \text{ tubos.}$$

Conociendo el número de tubos se puede calcular el diámetro de carcasa mediante el anexo 3. Diámetro de carcasa.

$$D_c = 8 \text{ plg} = 0,2032 \text{ m configuración triangular.}$$

Se requiere un intercambiador con una capacidad mínima de un área de 0,9 metros cuadrados, diámetro de 0,203 metros, longitud de 0,585 metros y una capacidad de enfriamiento de 104 litros por hora de agua. (Elaboración propia, 2022).

1.1.1.4. Enfriador diésel

Para el diseño se simuló en Aspen HYSYS un intercambiador de calor de doble tubo simple a contra corriente, esto debido a que las cantidades son a escala piloto (pequeñas), obteniendo los siguientes resultados para su diseño:

$$Q = 16529 \text{ W (calor removido)}$$

$\Delta T_m = 37,15 \text{ }^\circ\text{C}$ (diferencia de temperaturas media logarítmica)

$UA = 669 \text{ W/C}$ (coeficiente global por el área)

$M_{\text{H}_2\text{O}} = 267,4 \text{ l/h}$ (masa de agua necesaria para enfriar)

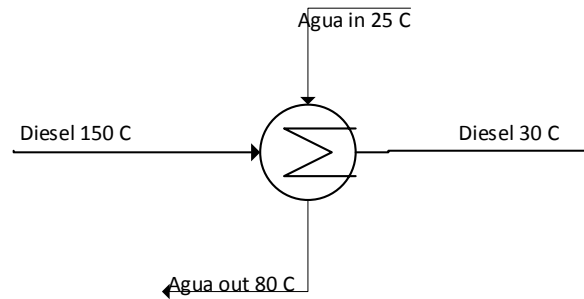


Figura 3-10. Diagrama intercambiador diésel.

Dado que los fluidos que participan del intercambio de calor son agua y combustibles, de acuerdo con Incropera y Dewitt, “Fundamentos de transferencia de calor” se utiliza el valor $U = 350 \text{ (W/m}^2\text{}^\circ\text{C)}$, para calcular el área necesaria para el intercambiador.

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_m$$

$$U \cdot A = 669 \text{ W/C} \quad (\text{Ec. 3-15})$$

$$A = \frac{669 \text{ W/C}}{U} \quad (\text{Ec. 3-16})$$

$$A = \frac{669 \text{ W/C}}{350}$$

$$A = 1.911 \text{ m}^2$$

$$A = 2,3 \text{ m}^2 \text{ (sobredimensión al 20\%)}$$

Cálculo de longitud:

$$A = \pi \cdot D \cdot L$$

$$L = \frac{A}{\pi * D}$$

$$L = \frac{2,3 \text{ m}^2}{\pi * 0,025\text{m}}$$

$$L = 29,3 \text{ m}$$

Cálculo de número de tubos, la longitud de los tubos otorgada del fabricante en base a la capacidad de enfriamiento es igual a 1,49 metros, diámetro interno sugerido de los tubos igual (DN 1^{1/4}plg) 35,1 milímetros, datos adjuntos en el anexo 1. Especificación de intercambiadores.

$$N_t = \frac{A}{\pi * D * L}$$

$$N_t = \frac{2,3 \text{ m}^2}{\pi * 0,0351\text{m} * 1,49\text{m}}$$

$$N_t = 15 \text{ tubos}$$

Conociendo el número de tubos se puede calcular el diámetro de carcasa mediante el anexo 3. Diámetro de carcasa.

$$D_c = 10\text{plg} = 0,25\text{m} \text{ configuración cuadrado}$$

Se requiere un intercambiador con una capacidad mínima de un área de 2,3 metros cuadrados, diámetro de 0,25 metros, longitud de 1,49 metros y una capacidad de enfriamiento de 267,4 litros por hora de agua. (Elaboración propia, 2022).

1.1.1.5. Bomba reactor

Para el diseño de la bomba se usará unas cañerías de acero comercial, para los diámetros de tuberías se usará la gráfica de (R. Mott), tenemos un diámetro interno de succión y un diámetro de descarga, grafica adjunto en el anexo 4. selección de tamaño de tubería.

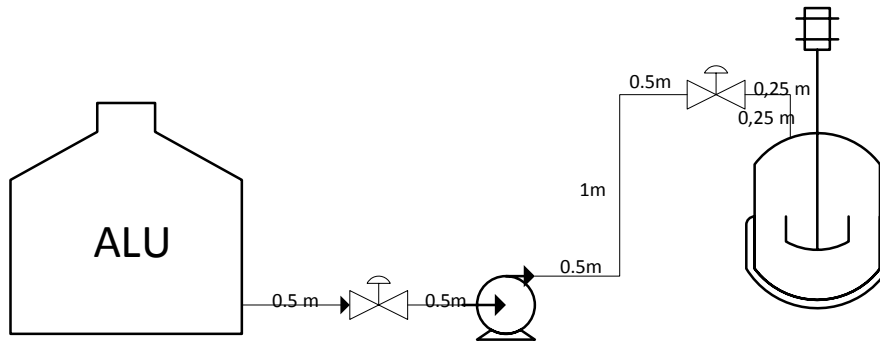


Figura 3-11. Diagrama bomba reactor.

$\mu = 0,21280 \text{ kg/m.s}$ (Viscosidad ALU).

$D_s = 0,0158 \text{ m}$. (diámetro interno de succión).

$D_d = 0,021 \text{ m}$. (diámetro interno de descarga)

$Q = 0,2988 \text{ m}^3/\text{h}$ (caudal)

$\epsilon = 4,572e-005$ (Rugosidad del acero)

$\rho = 836,633 \text{ kg/m}^3$ (densidad ALU)

<p>3 codos de 90° 2 válvulas de bola $L_c = 3,5 \text{ metros}$</p>
--

Usando la ecuación de balance macroscópico de energía para el cálculo de la altura de diseño tenemos:

$$H_{DIS} = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} + \frac{\Delta V^2}{2g} + \Delta Z + hf \quad (\text{Ec. 3-17})$$

$$hf = \frac{Vel^2}{2 \cdot g \cdot D_i} \sum (L_c + L_{ACC}) f \quad (\text{Ec. 3-18})$$

Donde:

ρ = densidad del ALU

g = gravedad (9,81 m/s²)

ΔP = diferencia de presión

ΔV = diferencia de velocidad

V_s = velocidad de succión

V_d = velocidad de descarga

V_{el} = velocidad (succión o descarga)

ΔZ = diferencia de altura

h_f = longitud equivalente del tramo total

L_c = longitud equivalente de la cañería

L_{acc} = longitud equivalente de accesorios

f = factor de fricción

Tramo de succión:

$$V_s = \frac{4Q}{\pi \cdot D_s^2} \quad \text{Ec. 3-19}$$

$$V_s = \frac{4 * 8,3e - 5 m^3/s}{\pi \cdot 0,0158 m^2}$$

$$V_s = 0,42 \text{ m/s}$$

Calculamos el número de Reynolds para encontrar el factor de fricción:

$$Re = \frac{D_i \cdot V_s \cdot \rho}{\mu} \quad (\text{Ec. 3-20})$$

$$Re = \frac{0,0158 m * 0,42 m/s * 843 kg/m^3}{0,21280 kg/m \cdot s}$$

$$Re = 26,288 \text{ flujo laminar.}$$

Dado a que le flujo es laminar no depende de la rugosidad del material “diagrama de Moody” (anexo 5) entonces el factor de fricción es igual:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{Ec. 3-2})$$

$$f = \frac{64}{26,288}$$

$$f = 2,434$$

De la figura 3-11 se obtiene la longitud de la cañería y los accesorios, la longitud equivalente de los accesorios se obtiene de la figura adjunta en el anexo 6. Longitud equivalente de accesorios.

Tabla III-7. Longitud de succión bomba reactor

Accesorios DN 15 (Lacc)	
Válvula de paso y cierre	0,76 m
Longitud de cañería DN 15 (Lc)	
Tubo de acero total	1 m

Usando la Ec. 3-18, tenemos:

$$hfs = \frac{0,42m/s^2}{2 * 9,81m/s^2 * 0,0158m} * (1m + 0,76m) * 2,434$$

$$hf\ succion = 2,43m$$

tramo de la descarga:

$$V = \frac{4Q}{\pi \cdot Dd^2} \quad (\text{Ec. 3-22})$$

$$V = \frac{4 * 8,3e - 5m^3/s}{\pi \cdot 0,021^2 m}$$

$$V = 0,24 m/s$$

Calculamos el número de Reynolds para encontrar el factor de fricción:

$$Re = \frac{Di \cdot Vd \cdot \rho}{\mu} \quad (\text{Ec. 3-22})$$

$$Re = \frac{0,021m * 0,21m/s * 843kg/m^3}{0,21280 kg/m \cdot s}$$

$$Re = 19,87 \text{ flujo laminar.}$$

Dado a que le flujo es laminar no depende de la rugosidad del material, entonces el factor de fricción es igual:

$$f = \frac{64}{Re}$$

$$f = \frac{64}{19,87}$$

$$f = 3,22$$

De la figura 3-11 se obtiene la longitud de la cañería y los accesorios, la longitud equivalente de los accesorios se obtiene de la figura adjunta en el anexo 6. Longitud equivalente de accesorios.

Tabla III-8. Longitud descarga bomba reactor

Accesorios DN 20 (Lacc)	
Válvula de paso y cierre	0,82 m
Codo 90	0,63 m
Codo 90	0,63 m
Codo 90	0,63 m
Total Lacc	2,71
Longitud de cañería DN 20 (Lc)	
Tubo de acero total	4.5 m

Usando la Ec. 3-18, tenemos:

$$hfd = \frac{0,24^2 m/s}{2 * 9,81 m/s^2 * 0,021 m} * (4,5 m + 2,71 m) * 3,22$$

$$hf \text{ descarga} = 3,26 m$$

perdida de carga total:

$$hf = \square f(\text{succión}) + \square f(\text{descarga}) \quad (\text{Ec. 3-23})$$

$$hf = 2,43 m + 3,26 m$$

$$hf = 5,7 m$$

Debido a que las presiones del proceso son iguales, usando la Ec. 3-17, tenemos:

$$H_{DIS} = \frac{\Delta V^2}{2g} + (h_2 - h_1) + 13,12$$

$$H_{DIS} = \frac{(0,24 m/s - 0,42 m/s)^2}{2 * 9,81 m/s^2} + 3 m + 5,7$$

$$H_{DIS} = 8,702 \text{ m}$$

Cálculo de la potencia teórica

$$P_t = Q \cdot g \cdot \rho \cdot H_{dis}$$

$$P_t = 8,3e - 5 * 9,81 * 843 * 8,702$$

$$P_t = 6 \text{ w}$$

Cálculo de la potencia real en general las bombas tienen una eficiencia media del 75%
(Testing and Research Centre How to improve efficiency of centrifugal pumps, 2009)

$$P_r = \frac{P_t}{0,75}$$

$$P_r = \frac{6 \text{ w}}{0,75}$$

$$P_r = 8 \text{ W}$$

Se necesita una bomba con una potencia de 8 W

1.1.1.6. Bomba Diesel

Para el diseño de la bomba se usará unas cañerías de acero comercial, para los diámetros de tuberías se usará la gráfica de (R. Mott), tenemos un diámetro interno de succión y un diámetro de descarga, grafica adjunto en el anexo 4. selección de tamaño de tubería.

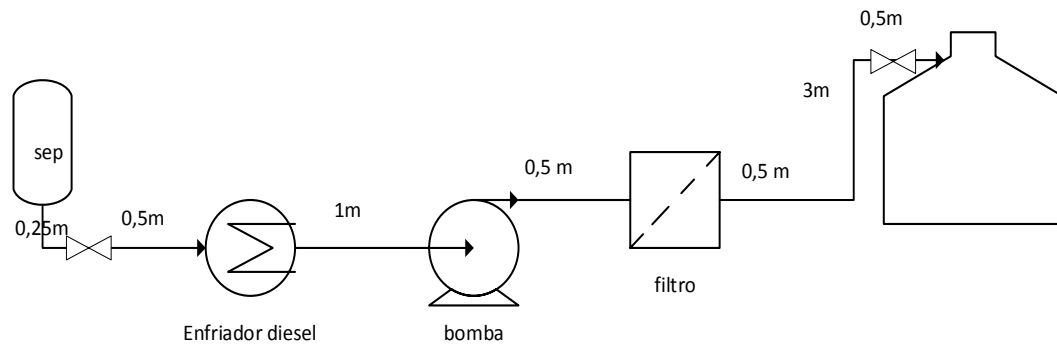


Figura 3-12. Diagrama bomba diésel.

$\mu = 0,002399 \text{ kg/ms}$ (Viscosidad Diesel)

$D_s = 0,0158 \text{ m}$ (diámetro succión)

$D_d = 0,021 \text{ m}$ (diámetro descarga)

$Q = 0,2473 \text{ m}^3/\text{h}$ (caudal)

$\epsilon = 4,572 \times 10^{-5}$ (Rugosidad del acero)

$\rho = 840 \text{ kg/m}^3$ (densidad del diésel)

2 codos de 90°

2 válvulas

$L_c = 6 \text{ metros}$

Usando la ecuación de balance macroscópico para el cálculo de la altura de diseño tenemos:

$$H_{DIS} = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} + \frac{\Delta V^2}{2g} + \Delta Z + hf$$

$$hf = \frac{V^2}{2 \cdot g \cdot D_i} \sum (L_c + L_{ACC}) f$$

Donde:

ρ = densidad del ALU

g = gravedad (9,81 m/s²)

ΔP = diferencia de presión

ΔV = diferencia de velocidad

ΔZ = diferencia de altura

h_f = longitud equivalente del tramo total

L_c = longitud equivalente de la cañería

L_{acc} = longitud equivalente de accesorios

f = factor de fricción

tramo de succión:

$$Vel = \frac{4Q}{\pi \cdot D_s^2}$$

$$Vel = \frac{4 * 6,86e - 5 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot 0,0159\text{m}^2}$$

$$Vel = 0,35\text{m}/\text{s}$$

Calculamos el número de Reynolds para encontrar el factor de fricción:

$$Re = \frac{D_s \cdot V \cdot \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{0,0158\text{m} * 0,35\text{m}/\text{s} * 840\text{kg}/\text{m}^3}{0,002399 \text{ kg}/\text{m} \cdot \text{s}}$$

$$Re = 1935,64 \text{ flujo laminar.}$$

Dado a que le flujo es laminar no depende de la rugosidad del material, entonces el factor de fricción es igual:

$$f = \frac{64}{Re}$$

$$f = \frac{64}{1935,64}$$

$$f = 0,033$$

Perdida de carga del intercambiador, "Transferencia de Calor", J. P. Holman.

$$-\Delta P = 2f \frac{L}{D} \rho \tilde{v}^2 \quad (\text{Ec. 3-27})$$

Datos obtenidos del intercambiador de calor de diésel ($D_i = 0,0351\text{m}$)

Remplazando valores en Ec. 3-27:

$$-\Delta P = 2 * 0.033 * \frac{1,49\text{m}}{0,0351\text{m}} * 840\text{kg/m}^3 * 0,35^2\text{m/s}$$

$$-\Delta P = 290\text{kg/m.s}^2$$

$$-\Delta P \text{ aprox} = 0,3\text{m}$$

De la figura 3-12 se obtiene la longitud de la cañería y los accesorios, la longitud equivalente de los accesorios se obtiene de la figura adjunta en el anexo 6. Longitud equivalente de accesorios.

Tabla III-9. Pérdidas succión bomba Diesel

Accesorios DN 15 (Lacc)	
Válvula de paso y cierre	0,76 m
Intercambiador	0,3 m
Codo	0,51m
Total, Lacc	1,57m
Longitud de cañería DN 15 (Lc)	
Tubo de acero total	1,75 m

$$hfs = \frac{0,35m/s^2}{2 * 9,81m/s^2 * 0,0158m} * (1,75m + 1,57 m) * 0,033$$

$$hfsuccion = 0,043 m$$

tramo de la descarga:

$$V = \frac{4Q}{\pi \cdot Dd^2}$$

$$V = \frac{4 * 6,86e - 5m^3/s}{\pi \cdot 0,021m^2}$$

$$V = 0,2 m/s$$

Calculamos el número de Reynolds para encontrar el factor de fricción.

$$Re = \frac{Di \cdot V \cdot \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{0,0158m \cdot 0,2m/s \cdot 836.66kg/m^3}{0,21280 \text{ kg/m.s}}$$

$$Re = 1463,30 \text{ flujo laminar}$$

Dado a que le flujo es laminar no depende de la rugosidad del material, entonces el factor de fricción es igual:

$$f = \frac{64}{Re}$$

$$f = \frac{64}{1463,30}$$

$$f = 0,043$$

De la figura 3-11 se obtiene la longitud de la cañería y los accesorios, la longitud equivalente de los accesorios se obtiene de la figura adjunta en el anexo 6. Longitud equivalente de accesorios.

Pérdida de carga del filtro = 0,01 Mpa = 1,019 m, dato obtenido del anexo 9. Pérdida de carga del filtro.

Tabla III-10. Pérdidas descarga bomba diésel

Accesorios DN 20 (Lacc)	
Válvula de paso y cierre	0,82 m
Codo 90	0,63m
Codo 90	0,63m
Filtro	1,019 m
Total Lacc	3
Longitud de cañería DN 20 (Lc)	
Tubo de acero total	4,5 m

$$hfd = \frac{0,2m/s^2}{2 * 9,81m/s^2 * 0,021m} * (4,5m + 3m) * 0,043$$

$$hf \text{ descarga} = 0,031 \text{ m}$$

$$hf = hf(\text{succión}) + hf(\text{descarga})$$

$$hft = 0,043 \text{ m} + 0,031 \text{ m}$$

$$hf = 0,075m$$

Debido a que las presiones del proceso son iguales entonces:

$$H_{DIS} = \frac{\Delta V^2}{2g} + (h_2 - h_1) + 0,075m$$

$$H_{DIS} = \frac{(0,2m/s - 0,35m/s)^2}{2 * 9.81m/s^2} + (3m - 0,25m) + 0,075m$$

$$H_{DIS} = 2,83m$$

Cálculo de la potencia teórica

$$P_t = Q \cdot g \cdot \rho \cdot H_{dis}$$

$$P_t = 6,86e - 5 * 9,81 * 840 * 2,83m$$

$$P_t = 1,6 w$$

Cálculo de la potencia real en general las bombas tienen una eficiencia media del 75% (Testing and Research Centre How to improve efficiency of centrifugal pumps, 2009)

$$P_r = \frac{P_t}{0,75}$$

$$P_r = \frac{1,6 w}{0,75}$$

$$P_r = 2,13W$$

Se necesita una bomba con una potencia de 2,13 W

1.1.2. Tuberías, válvulas y accesorios





Tabla III-11. Requerimiento de tuberías, válvulas y accesorios


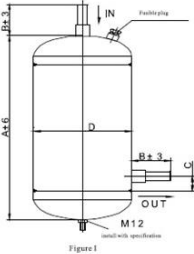


Proceso (acero)			Refrigeración (plástico)
Accesorio	DN15 (mm.)	DN20(mm.)	10 metros
Longitud	7m	5m	
Válvula globo	3	3	3 válvula globo
Codo 90°	4	4	8 codos

Fuente: Elaboración propia, 2022.

1.2. Especificación de los equipos

Tabla III-12. Especificación y dimensiones de los equipos

<p>Modelo = 2 x 20000 Capacidad = 20 m³ Dimensiones (D*H) = 3m * 3.35 m País=Bolivia Marca = Campeón Precio = (18350x2) = 38100 Bs</p>	<p>tanque lubricante usado</p> 
<p>Modelo = 20000 y 10000 Capacidad = 20 y 10 m³ Dimensiones = (D*H) = (3x3.3) m x (2.3x2,7) m País=Bolivia Marca = Campeón Precio total = 28800 bs</p>	<p>tanque diésel</p> 
<p>Modelo = 2700 Capacidad = 2,7 m³ Dimensiones (DxH) =(1,5 x 1,8)m País= Bolivia Marca = TANK BURG Precio = 2100 Bs (Bolivia)</p>	<p>Tanque desechos reactor</p> 
<p>Modelo = 2750 Capacidad = 2,75 m³ Dimensiones (DxH) =(1,5 x 1,8)m País= Bolivia Marca = Cantaro Precio total = 4280Bs (Bolivia)</p>	<p>Tanque ligeros (2x2750)</p> 

<p>Modelo = LH-3000L Capacidad máx.= 3 m³ Dimensiones (D*H) = 1,2m * 3,4m País = China Potencia = 7,5 KW@85rpm Marca = lianhe Precio = 8000 USD</p>	<p>Reactor</p> 
<p>Modelo = por pedido Volumen = 700 l Dimensiones = (H*D) = 1,4m * 1 m País = China Marca = Yongyesy Precio = 2500 USD</p>	<p>Separador</p>  <p>Figure 1</p>
<p>Modelo = UH-25 Capacidad máx. = 25 l/min Dimensiones (l*H) = 11,8 cm* 28,8 cm País = China Marca = TONGPAI Precio = 180 USD $\Delta P = 0,01$ Mpa Rendimiento = 99.5 %</p>	<p>Filtro</p> 
<p>Modelo = QR-250 Área max, enfriado= 1,2 m² Dimensiones (L) = 780 mm. País = China Marca = Taizhou Precio = 200 USD Cap. máx. agua = 150 l/min</p>	<p>Intercambiador Craqueados</p> 
<p>Modelo = QR-250</p>	<p>Intercambiador ligeros</p>

<p>Área max, enfriado= 1,2 m² Dimensiones (L) = 780 mm. País = China Marca = Taizhou Precio = 200 USD Cap max agua = 150 l/min</p>	
<p>Modelo = QR-250 Área máx. enfriado= 2,8 m² Dimensiones (L) = 1700 mm. País = China Marca = Taizhou Precio = 275 USD Cap. máx. agua = 200 l/min.</p>	<p>Intercambiador diésel</p> 
<p>Modelo = N-627 Potencia = 8W. Marca = Japtop Precio = 50USD Rendimiento = 75% Caudal máx. = 600l/h</p>	<p>2xBombas</p> 

Fuentes: Alibaba.com, (2022), vogt.cl, (2022), Marketplace. Tarija, (2022), Yongyesy.com, (2022).

Tuberías, válvulas y accesorios	
Proceso (acero) DN15 (mm.)	
Tuberías (5m)	205 bs
Codo (4)	40 x 4 = 160bs
Válvula globo (3)	300 x 3 = 900 bs
Proceso (acero) DN20 (mm.)	
Tuberías (5m)	410 bs
Codo (6)	85 x 4 = 340 bs
Válvula globo (3)	415 x 3 = 1245 bs
Refrigerado (plástico común)	
Tuberías 10 m	120 bs
Codo (8)	5 x 8 = 40 bs
Válvula globo (3)	30 x 3 = 90 bs
Total	3510 Bs (505 USD)

Fuentes: Marketplace. Tarija, (2022), Ebay. Bolivia, (2022).

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS ECONÓMICO

4.1. Cálculo de costo de capital

4.1.1. Inversión fija

En la inversión fija se calcula los costos de todo lo que sea tangible el costo de equipos y muebles, para poder iniciar el proyecto con el fin de sacar un costo capital para iniciar el proyecto.

En promedio el porcentaje de impuesto para el ingreso de equipos a Bolivia es de un 60 %. (Los tiempos, 2021).

Tabla IV-1. Costo fijo equipos

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (USD)	Impuestos (USD)	Total (USD)
1	Tanque ALU	pza.	total	5473	0	5473
2	Tanque diésel	total	total	4150	0	4150
3	Tanque ligero	pza.	total	615	0	615
4	Tanque desechos	pza.	total	622	0	622
5	Reactor	pza.	1	8000	4800	12800
6	Separador	pza.	1	2500	1500	4000
7	Filtro	pza.	1	180	108	288
8	Int. craqueados	pza.	1	200	120	320
9	Int. ligeros	pza.	1	200	120	320
10	Int. diésel	pza.	1	275	165	440
11	Bomba craq.	pza.	1	50	30	80
12	Bomba diésel	pza.	1	50	30	80
13	Tuberías, acc.	total	1	505	0	505
Total \$						29693

Se necesita un total de 29693 dólares contando los impuestos solo para la compra de todos los equipos para el diseño de la planta. (Elaboración propia, 2022).

Tabla IV-2. Costo fijo muebles

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs)	Valor Total (Bs)
1	Muebles administración				
	Escritorios	pza.	2	300	600
	Estantes	pza.	2	800	1600
	Eq. computación	pza.	2	4200	8400
2	Muebles de planta				
	Escritorio	pza.	1	300	300
	Estante	pza.	1	800	800
				Total (USD)	1681

Para el costo de muebles para la planta se requiere un total de 1681 dólares.

(Elaboración propia, 2022).

4.1.2. Inversión diferida

En la inversión diferida se calcula el costo de obras civiles, instalación y transporte. El costo de transporte de equipos en el interior de Bolivia es 7000 por camión tráiler (entrevista a chofer de camión, 2021). Se plantea ocupar un terreno total de 100 m² para el proceso y administración.

El costo de importar de China a Bolivia es hasta 10000 USD por container (Los tiempos, 2021). Se requerirá del flete de 1 container para hacer llegar los equipos de China a Bolivia.

Tabla IV-3. Costo inversión diferida obras civiles, instalación y transporte

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs)	Valor Total (Bs)
1	Pago de obras civiles	m2	40	500	20000
2	Transporte interior de Bolivia	flete	1	7000	7000
3	Transporte de importación	flete	1	70000	70000
4	Terminaciones	m2	30	340	10200
5	Montaje de maquinaria y equipos	pza	13	500	6500
				Total, USD	16336

El costo de la inversión diferida para la planta se requiere un total de 16336 dólares, (Elaboración propia, 2022).

Los datos de los precios de son de referencia al proyecto de gestión de proyectos industriales de ingeniero (Rene Michel Cortes 2021).

4.1.3. Costo total

Tabla IV-4. Costo total

Total	
Detalle	USD
Inversión fija	31374
Inversión diferida	16336
Total	47710

Se requiere un total de 47710 USD (cuarenta y siete mil setecientos diez dólares) para poder iniciar el proyecto. (Elaboración propia, 2022).

4.2. Costo de operación

4.2.1. Costo de materias primas

Las materias primas para el proyecto es el lubricante usado para el proceso y el agua para su refrigeración en los intercambiadores de calor.

En la ciudad de Tarija no se tiene dato exacto del valor del aceite usado debido a que algunos solo lo desechan y otros lo venden por barril de 300 a 350 bs haciendo un promedio de 2 bs/ litro. (Elaboración propia, 2021).

Según Cosaalt Tarija 2021 la tarifa del precio de agua es 2,93 bs/m³, tomando datos de tabla de balance de materia.

Tabla IV-5. Proyección de costo de agua y materia prima

Año	ALU (m ³)	Costo ALU (bs)	Agua (m ³)	Costo agua (bs.)	Total USD
2023	382	763085	1188	3482	110139
2024	404	808704	1253	3672	116721
2025	429	857318	1559	4568	123834
2026	454	908698	1404	4115	131151
2027	482	963302	1488	4360	139032
2028	511	1021133	1580	4629	147380
2029	541	1082419	1672	4899	156224
2030	574	1147392	1772	5193	165601
2031	608	1216051	1872	5485	175508
2032	645	1289088	1998	5854	186055
2033	683	1366502	2107	6175	197224

Fuente: elaboración propia, 2022.

4.2.2. Costo de procesos

Para los procesos se necesita el precio de la cantidad de gas que se requiere usar en el reactor químico, para poder realizar el craqueo térmico del lubricante usado.

El poder calorífico del gas natural en Bolivia es 38525,75 kJ/m³ (Decreto Supremo N° 27448) con un precio de 1,52 bs el m³. (YPFB,2021).

Tomando datos calculados de calor necesario para el reactor, tenemos:

Tabla IV-6. Proyección costo energético de gas

AÑO	GAS (m ³)	PRECIO USD
2023	12433	2715
2024	13134	2868
2025	13939	3044
2026	14717	3214
2027	15600	3407
2028	16586	3622
2029	17547	3832
2030	18611	4064
2031	19675	4297
2032	20895	4563
2033	22141	4835

Fuente: elaboración propia, 2022.

Para el costo de energía eléctrica necesaria se toma datos de potencia de las especificaciones de los equipos sumándolas todas, el rendimiento de la bomba es del 75%, (bomba craqueados 4W, bomba diésel 8W, Reactor 7,5 KW y un consumo medio) asiendo un total de 13,1 kW, y multiplicando por las horas de trabajo que son 8 horas por día.

El precio de corriente eléctrica para industrias en Tarija es de 0,802 Bs por KWH. (El deber, 2021)

Tabla IV-7. Costo de energía eléctrica por año.

KW	KWH	Precio Bs AÑO	Precio USD AÑO
13,10	104,8	24206	3478

Fuente: elaboración propia, 2022.

4.2.3. Costo de mano de obra

Tabla IV-8. Costo salarios por año

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs)	Valor Total (Bs)
jefe de producción	mes	13	4000	52000
Personal Contratado (2 empleado)	mes	13	2250	58500
Administrador	mes	13	2800	36400
			Total, USD	21106

Fuente: elaboración propia, 2022.

4.2.4. Cálculo de depreciación

En Bolivia los factores de depreciación básicos son obtenidos de: (Bolivaimpuestos,2021).

Tabla IV-9. Depreciación

	Equipos	Muebles	Edificios	Total USD
Inversión	29693	1681	4339	
Factor	0,1	0,1	0,025	
año				
2023	2969	168	108	3246
2024	2969	168	108	3246
2025	2969	168	108	3246
2026	2969	168	108	3246
2027	2969	168	108	3246
2028	2969	168	108	3246
2029	2969	168	108	3246
2030	2969	168	108	3246
2031	2969	168	108	3246
2032	2969	168	108	3246
2033	2969	168	108	3246
Total	32662	1849	1193	35705
Inv. Ad	2969	168	0	3137
V.R	0	0	3146	3146

Como inversión adicional se calcula a 3137 USD y de valor residual tenemos 3146 USD. (Elaboración propia, 2022).

4.2.5. Costo total de producción

El costo de producción los directos son el costo de materia prima, consumo de energía y el costo de mano de obra, y los indirectos es la depreciación de los equipos, Sumando los costos indirectos y directos, tenemos un costo total de producción de:

Tabla IV-10. Costo total de producción

Año	Directos	Indirectos	Total USD
	costo USD	costo USD	
2023	137438	3246	140684
2024	144173	3246	147419
2025	151463	3246	154708
2026	158950	3246	162195
2027	167023	3246	170269
2028	175586	3246	178832
2029	184640	3246	187886
2030	194250	3246	197496
2031	204389	3246	207635
2032	215202	3246	218448
2033	226643	3246	229889

Fuente: elaboración propia, 2022.

4.3. Financiamiento

4.3.1. Capital de operación

Para el primer año de producción se necesita un total de 140667 USD para ejecutar la operación óptima de la planta piloto, lo cual se propone un financiamiento de los primeros 3 meses iniciales para poner en operación la planta. (Elaboración propia, 2022).

Tabla IV-11. Costo de capital de operación

Costo capital de operación anual USD	Costo capital de operación/mes USD	Costo capital de operación para 3 meses USD
140684	11724	35171

Fuente: elaboración propia, 2022.

4.3.2. Inversión total y financiamiento

El costo de los imprevistos es el 10% (Rene Michel, 2021). Sumando el costo de capital para iniciar el proyecto y el capital de operación para poner en marcha la producción tenemos:

Tabla IV-11. Inversión total

Detalle	USD
Costo capital (equipos, instalación)	47710
Capital de operación (3meses)	35171
inv. Adicional (depreciación)	3137
Imprevistos 10%	8602
Total, de inversión	94621
Aporte solicitado (80 %)	75696
Aporte propio (20 %)	18924

Se pedirá prestado al banco un total de 76000 USD (setenta y seis mil dólares americanos). (Elaboración propia, 2022).

4.3.3. Plan de pagos

El interés por préstamo para proyectos en el país de Bolivia es de 10% (Bolivia emprende, 2021). Se plantea pagar el costo capital de 76000 USD en un periodo de 10 años. Calculamos el plan de pagos en base al costo capital y la amortización que es la cota que se debe pagar.

Donde:

$$M = K \left[\frac{(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (\text{Ec. 4-1})$$

K = costo capital

I = tasa de interés

N = periodo

Tabla IV-12. Plan de pagos

Año	Saldo Capital	Interés "I"	Amortización "A"	Total (I+A)
1	76000	7600	4769	12369
2	71231	7123	5246	12369
3	65986	6599	5770	12369
4	60216	6022	6347	12369
5	53869	5387	6982	12369
6	46887	4689	7680	12369
7	39207	3921	8448	12369
8	30759	3076	9293	12369
9	21466	2147	10222	12369
10	11244	1124	11244	12369
			76000	

Fuente: elaboración propia, 2022.

Por cada año se deberá pagar al banco 12369 USD por año en un periodo de 10 años

4.4. Flujo de caja

4.4.1. Cálculo de ingresos

En Bolivia el impuesto por venta de diésel es 0,77 USD por barril dando a 4,8427 dólar por m³. (Decreto Supremo N.º 25530, 30 de septiembre de 1999).

El precio del diésel en el país de Bolivia es de 3,72 bs el litro. Se asume las pérdidas de manejo a un 1%. Calculando la ganancia en base a la cantidad de diésel que se produce tenemos:

Tabla IV-13. Ingresos totales

Año	Diésel m ³	Perdidas manejo m ³	Ganancia USD	Impuestos USD	Ganancia total USD
2023	316	3	167014	1529	165485
2024	335	3	176998	1620	175378
2025	355	4	187638	1717	185921
2026	376	4	198883	1820	197063
2027	398	4	210835	1930	208905
2028	422	4	223492	2045	221446
2029	448	4	236905	2168	234737
2030	475	5	251126	2298	248827
2031	503	5	266153	2436	263717
2032	533	5	282138	2582	279556
2033	565	6	299082	2737	296344

Fuente: elaboración propia, 2022.

4.4.2. Pérdidas y ganancias

Se calcula el total de ingresos y el total de costo para realizar el proyecto. El IVA en Bolivia es de 13%, (Bolivia impuestos, 2022).

$$\text{Costo total} = \text{costo producción} + \text{plan de pago} \quad (\text{Ec. 4-2})$$

$$\text{Utilidad bruta} = \text{ingreso} - \text{costo total} \quad (\text{Ec. 4-3})$$

$$\text{Utilidad neta} = \text{utilidad bruta} - \text{impuestos} \quad (\text{Ec. 4-4})$$

Tabla IV-14. Pérdidas y ganancias

AÑO	Ingreso total USD	Costo total USD	Utilidad bruta	Impuestos	Utilidad neta
Inversión					94621
2023	165485	153053	12432	1616	10816
2024	175378	159788	15591	2027	13564
2025	185921	167077	18844	2450	16394
2026	197063	174564	22499	2925	19574
2027	208905	182638	26267	3415	22853
2028	221446	191201	30246	3932	26314
2029	234737	200255	34482	4483	30000
2030	248827	209864	38963	5065	33898
2031	263717	220004	43713	5683	38031
2032	279556	230817	48739	6336	42403
2033	296344	229889	66455	8639	60962
V.R					3146

Fuente: elaboración propia, 2022.

4.5. Análisis de rentabilidad

4.5.1. Relación B/C

$$B \div C = \frac{\text{ganancia total}}{\text{costo total}} \quad (\text{Ec. 4-5})$$

$$B \div C = \frac{2477382}{2118965}$$

$$B \div C = 1,169$$

El proyecto es rentable debido el beneficio es mayor que el costo y que la ganancia es 1,23 veces que la inversión total. (Elaboración propia, 2022).

4.5.2. Valor actual neto

$$VAN = \sum_{t=1}^N \frac{Ft}{(1+i)^t} - I_0 \quad (\text{Ec. 4-6})$$

Ft = utilidad neta

Io = inversión total

I = tasa de interés 10%

T = periodo de años

$$V. A. N. = 51303 \text{ USD}$$

V.A.N. = mayor a cero el proyecto es viable. (Elaboración propia, 2022).

4.5.3. T.I.R. (tasa interna de retorno)

Aplicando solver:

$$V. A. N. = 0 \quad (\text{Ec. 4-7})$$

$$T.I.R. = 19,87\%$$

El T.I.R. es mayor a la tasa de interés y mayor a cero el proyecto es viable. (Elaboración propia, 2022).

4.6. Optimización técnica

A partir de la figura 3-4 (caso de estudio del reactor), y en base a los datos obtenidos de hysis, el caso de estudio para el porcentaje de pureza del diésel, el límite permitido por ley es de 75 % se realizaron cálculos para un 80% de pureza debido a recomendación porque el diésel es reciclado. (Elaboración propia, 2022).

4.7. Optimización económica

Realizando los cálculos de T.I.R. en base al precio de compra de (ALU) el T.I.R. debe ser mayor a la tasa de interés del financiamiento (10%). (Ing. José Auad, 2022) Tabla IV-15.

Análisis de sensibilidad

precio de ALU bs/l	T.I.R.
1,5	50,38%
1,6	44,14%
1,7	38,04%
1,8	32,03%
1,9	26,04%
2	19,87%
2,1	13,75%
2,15	11%
2,16	10,00%

Fuente: elaboración propia, 2022.

El valor máximo que se debe comprar el lubricante usado tiene que ser 2,16 bs el litro para que el proyecto esté en equilibrio, pasando esta cifra el proyecto no será viable.

(Elaboración propia, 2022).

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- En base al parque automotor de la ciudad de Tarija se generan 99351 litros de aceite lubricante usado por cada mes de vehículos a motor a gasolina, que son el 84,6% de vehículos de la ciudad de Tarija.
- Se usó el proceso de valorización energética, mediante el craqueo térmico para la conversión de aceite lubricante usado a diésel N2, cual consiste en calentar el lubricante hasta los 320°C en un reactor, degradando el lubricante en hidrocarburos más ligeros.
- El diseño de la planta piloto tiene una capacidad máxima de procesar 250 kg/hora de lubricante usado con un rendimiento global del 82,5%, cual mediante el diseño de los equipos se requiere un reactor de volumen de 3m³, un separador de volumen de 0.66m³, tres intercambiadores de calor (dos de 0,9 m² y uno de 2,3 m²) de área de transferencia de calor y dos bombas centrifugas.
- El producto obtenido del proyecto es el combustible sintético diésel N2 cual es menos denso, contiene más metales pesados y menos refinado que el diésel común, generalmente se usa en vehículos agrícolas, camiones y hornos industriales.
- Para la implementación del proyecto se requiere una inversión total de 94621 dólares americanos, (80% aporte solicitado y 20% aporte propio), mediante el estudio económico el proyecto es rentable cual este genera un T.I.R. del 19,87% a un precio de compra de 2 bs. el litro de aceite lubricante usado.

5.2. Recomendaciones

- Obtener convenios con los talleres que generan el lubricante usado, para obtener una cantidad fija del lubricante usado y poder bajar el precio de compra, debido a que no se tiene un dato exacto del precio de venta.
- El precio límite de compra de lubricante usado es de 2,16 bs. el litro pasado esta cifra el proyecto no será rentable.
- Para el proceso se requiere solo lubricante usado de autos a gasolina, debido a que los motores a diésel tienen más contaminantes y diferente viscosidad en sus lubricantes usados.
- El diésel obtenido puede usarse en tractores, camiones y hornos no se recomienda su uso en autos de baja cilindrada debido a que el diésel N2 tiene más porcentaje de metales pesados.
- Al plantear una planta piloto se recomienda que su escala sea mediana y/o no a escala pequeña, debido a que los equipos para ese tipo de escala son muy difíciles de encontrar.