

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA QUIMICA, INGENIERÍA PETROQUIMICA**  
**INGENIERÍA AMBIENTAL, INGENIERÍA ALIMENTOS**



**PROYECTO DE GRADO**

**“PRODUCCIÓN DE JET FUEL A PARTIR DE ACEITES  
VEGETALES MEDIANTE EL PROCESO DE HIDROCRACKING  
PARA LA REFINERÍA GUALBERTO VILLARROEL A TRAVÉS DE  
LA SIMULACIÓN EN HYSYS”**

PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO PETROQUIMICO

**POSTULANTE:** Univ. Cossio Soliz Sergio Alejandro

**TUTOR:** Msc. Ing. Erlan William Espinoza Alarcon

**La Paz - Bolivia**

**Abril - 2024**



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis queridos padres Brigitte Soliz Riverin, Mario Arias Duran, a mis padrinos Ricardo Cori y Nelssy Cori.

## TESTIMONIO DE GRATITUD

Deseo expresar mi más sincero reconocimiento a los señores docentes de la carrera Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería por haberme guiado durante los años de mi formación profesional en las aulas de la universidad Mayor de San Andrés.

Dedico todo este trabajo a mi mamá Brigitte Soliz Riverin, a Mario Arias Durán, mis hermanos Mario, Andrea, Ariana; a mis padrinos Ricardo Cori y Nelssy Cori por colaborar y no rendirme en la vida fueron mi motor para lograr este sueño y a todo el gran esfuerzo que siempre dio por verme como un gran profesional, a Dios que paso a paso siempre estuvo ahí para guiarme y darme fuerzas ante cualquier dificultad, ya que tuve tropiezo y caídas en la vida.

Hago extendido mi reconocimiento a mi tutor Msc. Ing. Erlan William Espinoza Alarcón docente de la carrera de Ingeniería química, por colaborar y instruirme en la elaboración de mi proyecto de grado, al proporcionarme su ayuda en la elaboración de la simulación en el software en Hysys. Al Dr. Cristhian Carrasco por guiarme y orientado a proporcionarme información de revistas científicas y datos en inglés.

Sobre todo, deseo agradecer al Ing. Lic. Pastor Rafael Deuer Deuer MBA y al Dr. Morales Maldonado Santiago mis profesores a quienes manifesté mi más grato reconocimiento por haberme ayudado, instruido, motivado y brindado su valiosa colaboración y asesoramiento profesional en el desarrollo y la elaboración de mi proyecto de Grado.

A todos ellos mi más sincera gratitud.

## RESUMEN

El proyecto producción de Jet Fuel a partir de aceites vegetales mediante el proceso de hidrocracking, es una simulación mediante el uso de software en Hysys que está determinado para la Refinería Gualberto Villarroel, para satisfacer la demanda en Bolivia, ubicada en la Avenida Petrolera carretera antigua, Santa Cruz, Cochabamba – Bolivia.

Para tal efecto el estudio comprende una revisión de los antecedentes de la Biocombustibles en energías alternativas en Bolivia haciendo énfasis en el proyecto.

El presente proyecto tiene como objetivo principal determinar las condiciones más apropiadas para la obtención de Jet ful (biodiesel) en presión, temperatura, y los flujos masicos a partir de aceites vegetales que la materia prima va hacer aceite de cocina usado.

Se analizará el sistema de Hidrocraqueo catalítico utilizando software de simulación como Hysys para optimizar parámetros óptimos para la obtención de Jet fuel. Y el excel para realizar los costos, el proyecto es teórico y no se hará ningún laboratorio.

Finalmente se incluye un estudio Económico financiero y técnico donde se efectúa un análisis de la inversión inicial, de los costos de los equipos y los costos de la venta de jet ful. Todo ello cataloga al proyecto como ejecutable en condición de rentabilidad.

Está gestión de 2022 a partir de a agosto hasta el mes marzo del año 2024 se piensa defender el proyecto de grado. Por otra parte, el proyecto está realizado con datos actuales entre 2018 a 2020.

La licencia que se utilizará es de ECOFINING PROCESS administrado y otorgado por la empresa TOTAL cuyo costo aproximado es de 300 millones de dólares americanos.

## ABSTRACT

The Jet Fuel production project from vegetable oils through the hydrocracking process is a simulation using Hysys software that is determined for the Gualberto Villarroel Refinery, to satisfy the demand in Bolivia, located on the Avenida Petrolera old road. Santa Cruz, Cochabamba – Bolivia.

For this purpose, the study includes a review of the background of Biofuels in alternative energies in Bolivia, emphasizing the project.

The main objective of this project is to determine the most appropriate conditions for obtaining Jet ful (biodiesel) in pressure, temperature, and mass flows from vegetable oils that the raw material will make used cooking oil.

The catalytic Hydrocracking system will be analyzed using simulation software such as Hysys to optimize optimal parameters for obtaining Jet fuel. And the excel to carry out the costs, the project is theoretical and no laboratory will be done.

Finally, a financial and technical economic study is included where an analysis of the initial investment, the costs of the equipment and the costs of the sale of jet ful are carried out. All of this classifies the project as executable in a profitable condition.

This 2022 administration, from August to March 2024, plans to defend the degree project. On the other hand, the project is carried out with current data between 2018 and 2020.

The license that will be used is ECOFINING PROCESS administered and granted by the company TOTAL, whose approximate cost is 300 million US dollars.

# INDICE

1	CAPÍTULO I: GENERALIDADES .....	1
1.1	ANTECEDENTES .....	1
1.1.1	Kerosene .....	2
1.1.2	El Jet - fuel.....	3
1.1.3	Biocarburantes .....	4
1.1.4	El bioetanol.....	4
1.1.4	Biodiesel.....	5
1.2.	PROCESO TRADICIONAL DE OBTENCION DE QUEROSENO .....	5
1.3.	PROCESO PROPUESTO DE OBTENCION DE QUEROSENO.....	6
1.4	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
1.4.1	Identificación del problema.....	7
1.5	OBJETIVOS.....	9
1.5.1	Objetivo general .....	9
1.5.2	Objetivos específicos.....	9
1.6	JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....	10
1.6.1	Justificación académica.....	10
1.6.2	Justificación económica.....	11
1.6.3	Justificación social.....	12
1.6.4	Justificación ambiental .....	13
2	CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	14
2.1	CARACTERÍSTICAS DEL KEROSENO .....	14
2.1.1	Punto de ebullición .....	14
2.1.2	Color.....	14
2.1.3	Bajo contenido de azufre.....	14

2.1.4	Propiedades Fisico-quimicas.....	14
2.2	LA SOYA.....	15
2.3	COMBUSTIBLE EN EL SECTOR DE AVIACION .....	17
2.4	ACEITE VEGETAL.....	19
2.4.1	Características físicas de aceite de reciclado.....	20
2.5	CALIDAD DEL BIODIESEL.....	22
2.6	REACCIONES DEL HYDROCRACKING .....	24
2.6.1	Temperatura del Catalizador .....	28
2.6.2	Conversión .....	29
2.6.3	Calidad de la Carga Fresca.....	29
2.6.4	Azufre y Compuestos de Nitrógeno.....	29
2.6.5	Volumen de Hidrógeno.....	30
2.6.6	Catalizador en permanente Envenenamiento .....	30
2.6.7	Líquido Reciclado .....	30
2.6.1	Reformado.....	30
2.7	HIDROPROCESAMIENTO CATALÍTICO DE ESTERES Y ÁCIDOS GRASOS (HEFA).....	32
2.8	PROCESOS COMERCIALES.....	33
3	CAPITULO III “METODOLOGIA DE OPTIMIZACIÓN” .....	35
3.1	INTRODUCCION. ....	35
3.2	CARACTERISTICAS DEL ACEITE.....	35
3.2.1	Característica de la soya .....	37
3.3	METODO MATEMATICO PARA MAXIMIZAR Y MINIZAR. ....	38
3.4	DISEÑO Y SIMULACION DE LA COLUMNA.....	40
3.4.1	Aspectos generales de la columna.....	40

3.4.2	Paquete de simulación en HYSYS .....	40
4.	CAPITULO IV: PROCEDIMIENTO, METODO Y MODELOS DE SOLUCION...	42
4.1	DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS PARA LA SIMULACION.....	42
4.1.1	Corriente de masa: .....	42
4.1.2	Uso de Separador .....	43
4.1.3	Uso de columna.....	43
4.1.4	INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	43
4.1.5	MEZCLADOR.....	43
4.1.6	BOMBA .....	44
4.2	SIMULADOR HYSYS.....	44
4.3	MODELACION Y SIMULACION DEL PROCESO DE HYDROCRACKING USANDO EL SOFTWARE HYSYS.....	45
4.3.1	Datos de entrada .....	45
4.3.2	Descripción del proceso .....	50
4.3.3	Equipos propuestos.....	51
4.3.4	Ventajas de la propuesta de sistema.....	52
4.3.5	Calculo de volumen para un separador separador.....	53
4.4	CALCULO DE LA COLUMNA FUJO DE ENTRADA Y SALIDA.....	58
4.4.1	FLUJO DE ENTRADA Y DE SALIDA DE LA TORRE .....	59
4.4.2	Funciones multivariabes obtenidas.....	61
4.4.3	Función objetivo .....	65
5	CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA.....	70
5.1	ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA .....	70
5.1.1	Análisis FODA .....	70
5.2	ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA.....	72

5.2.1	Evaluación de costos.....	72
5.3	ANÁLISIS DE COSTO – BENEFICIO .....	74
5.3.1	Cálculo del Valor Presente Neto.....	74
5.3.2	VPN de costos iniciales .....	74
5.3.3	VPN de costos operativos y de mantenimiento anuales.....	75
5.4	DETERMINACIÓN PRECIO DE VENTA.....	76
6	CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	77
6.1	CONCLUSIONES.....	77
7	BIBLIOGRAFÍA.....	80
	ANEXOS .....	87

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1. Propiedades de fisicoquímicas de keroseno .....	15
TABLA 2. Producción de superficie y rendimiento periodo 2013-2022 .....	16
TABLA 3. Componentes de las gasolinas .....	23
TABLA 4. Lista de ASTM para determinar la calidad del biodiesel .....	23
TABLA 5. Procesos comerciales para la producción de jet Fuel renovable .....	34
TABLA 6. Normas para determianr las propiedades de aceite vegetal .....	36
TABLA 7. Viscosidad dinamica de los aceites vegetales .....	38
TABLA 8. Flujo de entrada de alimentación .....	42
TABLA 9. Flujos de entrada del agua y la alimentación presión y temperatura .....	46
TABLA 10. Flujos de intercambiador de Calor E-100 .....	47
TABLA 11. Flujos de separador V-101 .....	47
TABLA 12. Flujos de un mezclador MIX - 102 .....	47
TABLA 13. Flujos de vapor Seco .....	48
TABLA 14. Flujos de Separador V - 103 .....	48
TABLA 15. Flujos de Gas seco .....	48
TABLA 16. Flujos de salida de Nafta .....	49
TABLA 17. Flujos de salida de Nafta.....	49
TABLA 18. Flujos de salida de Nafta .....	49
TABLA 19. Flujos de salida del Keroseno y Jet Fuel .....	61
TABLA 20. Características del polinomio A .....	63
TABLA 21. Características del polinomio B .....	64
TABLA 22. Resultados función objetivo del flujo másico de jet fuel.....	66
TABLA 23. Resultados función objetivo de la temperatura de la torre.....	67
TABLA 24. Resultados finales de la Optimización .....	68
TABLA 25. Dimensiones de la torre de destilación .....	68
TABLA 26. Aspectos de Fortaleza .....	70
TABLA 27. Aspectos de oportunidades .....	71
TABLA 28. Aspectos de debilidades .....	71
TABLA 29. Aspecto de Amenazas .....	72

TABLA 30. Costo de Materia Prima .....	73
TABLA 31. Costos generales .....	73
TABLA 32. Cálculo de costos Fijos de las maquinas .....	74
TABLA 33. Costo de venta al mercado .....	76
TABLA 34. Costos de productos .....	76

## **INDICE DE IMAGENES**

IMAGEN 1. Potencial hidrocarburifero y gasifero en Bolivia .....	2
IMAGEN 2. Mercado de combustible para aviones de crecimiento 2002 -2027 ....	73
IMAGEN 3. Produccion de soya en Bolivia.....	74
IMAGEN 4. Control de almacen de Jet Fuel aviacion .....	76
IMAGEN 5. Ecuacion General de la reaccion de trigliceridos .....	76
IMAGEN 6. Mecanismo de reaccion de trigliceridos.....	21
IMAGEN 7. Mecanismo de Hidrocracking .....	73
IMAGEN 8. Reacciones tipicas del Hidrocracking.....	74
IMAGEN 9. HEFA para la produccion de biocombustibles para avion.....	76
IMAGEN 10. Flujos de entrada del agua y la alimentacion.....	47
IMAGEN 11. Un separador en la simulacion Hysys.....	73
IMAGEN 12. Una torre de destilacion en Hysys.....	74
IMAGEN 13. Esquema de una torre de destilacion .....	76
IMAGEN 14. Una torre de destilacion en Hysys.....	76

## **ANEXOS**

ANEXOS A: Relación de Temperatura del Separador.....	87
ANEXOS B: Flujo de caja proyectada a 5 años.....	92
ANEXOS C: Simulación y Modelación del Proceso de Hidrocracking.....	93
ANEXOS D: Tabla de simulación de Hysys de flujos de materiales.....	94

## GLOSARIO DE TERMINOS

Temperature: Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

Pressure: Presión (bar)

Stripper: Una columna de evaporación-stripper.

Regenerador: Repetidor dispositivo eléctrico.

Duty: Se refiere a la resistencia de la máquina.

Vessel Temperature: Temperatura del recipiente

Product Molar Flow: Producto Flujo molar.

Product mass Flow: Flujo másico del producto.

Product Pressure: Presión del producto.

Head Height: Altura de la cabeza.

ASTM: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.

ROM: Numero de octanaje de investigación.

Hidrodesoxigenacion: proceso de descomposición térmica de la biomasa.

Lumps: Trozos industriales.

Mass Flow: flujo masico (kg/h).

Std ideal Liquid: Flujo de volumen líquido

Vol Flow: flujo volumetrico

VPN: Valor de los flujos de efectivo proyectados

Alquilbencenos: Derivados de benceno.

Molar Entropy: Entropia molar (KJ/kgmol)

Transesterificacion: reacción de un triglicérido para formar alquil ésteres y glicerol.

MON: Comportamiento de la gasolina de un motor.

Olefinicos: Compuestos que tienen al menos un doble enlace Carbono-Carbono.

Isoparafinas: Hidrocarburos con ramificación en el penúltimo átomo.

CFR: Razon de carga Combinada

Naftelicos: naftenos, cicloparafinas o bencenos hidrogenados.

Isoparafinicos: Derivados sintéticamente de fluidos de hidrocarburos.

BHD: Bio Hidrodined Diesel (Diésel Bio Hidrodinado).

Refining: Refinacion.

Cat Refor: Reformador catalitico.

# CAPÍTULO I: GENERALIDADES

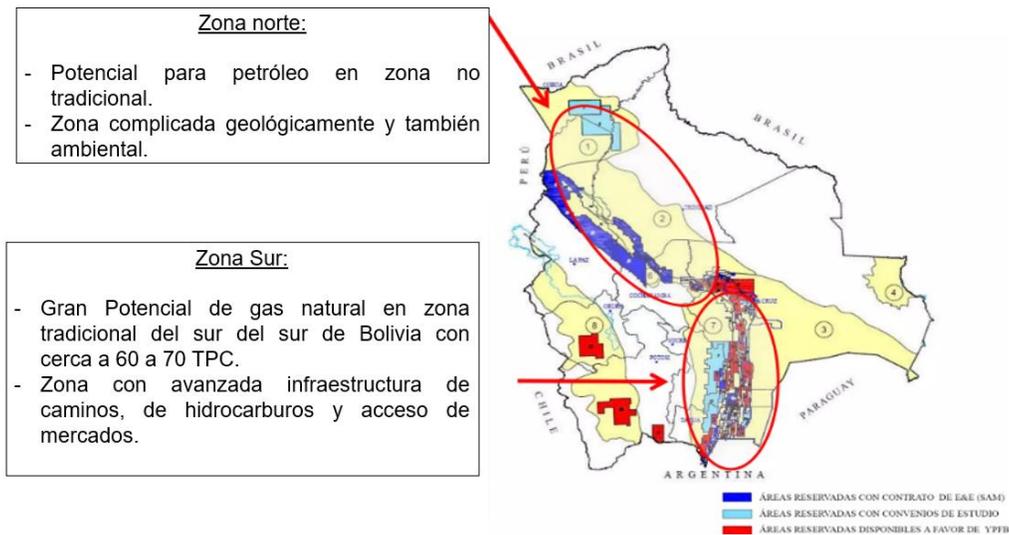
## 1.1 ANTECEDENTES

Se conoce que Bolivia cuenta con grandes áreas que poseen gran potencial hidrocarburífero, se han llevado a cabo esfuerzos en investigación y desarrollo para mejorar la sostenibilidad de la producción de biocombustibles en Bolivia.

Bolivia ha demostrado un interés particular en abordar las preocupaciones ambientales y sociales con la producción de biocombustibles ambientales. Se busca asegurara que la producción sea sostenible y respetuosa con el medio ambiente, evitando impactos negativos en la seguridad alimentaria y el uso de tierras.

### IMAGEN 1.

#### Potencial hidrocarburífero y Gasífero en Bolivia



Fuente: Información al Ministerio de hidrocarburos y Energía.

Bolivia ha demostrado un interés particular en abordar las preocupaciones ambientales y sociales con la producción de biocombustibles ambientales.

En la imagen 1 se muestra la zona norte y la zona sur. Donde la zona norte tiene complicaciones geológicamente y ambientales en instalar plantas de hidrocarburos, por lo que no es recomendable.

En la zona sur tiene gran productividad en el campo de gas natural ya que es una zona tradicional. Las áreas de color rojo y celeste son reservas de disponibilidad favor a YPFB y el color azul oscuro son áreas reservadas con contrato de E&E.

Bolivia cuenta con áreas que poseen gran potencial hidrocarburífero en gas y condensado, además de la ubicación que le permite.

### 1.1.1 Kerosene

El kerosene es un líquido oleoso de incoloro a amarillento de olor fuerte. Es una mezcla de hidrocarburos de petróleo. Se utiliza en calefacción, en lámparas, estufas, bengalas, agentes desengrasantes, plaguicidas, disolventes de pinturas y como combustibles para aviones.

El kerosene se ha convertido en los últimos años el combustible que nutre el transporte aéreo en Bolivia, Sud América y el mundo. Producto de esta situación y teniendo en cuenta que la demanda de Queroseno dentro del país se incrementa con los años.

A continuación, se muestra una gráfica a nivel mundial la crecida aumento de la producción y consumo mundial de biocombustibles:

**GRAFICA 1. Producción y Consumo Mundial de biocombustible**



Fuente: Según Vesna Mankovic U. Periódico Bolivia, 2019.

En la figura 1, se muestra la crecida producción y consumo de los biocombustibles a nivel mundial. Desde el año 2010 se tenía una producción baja de 123 miles de millones de litros y en el año 2020 aumentaron a 165 miles de millones de litros.

### 1.1.2 El Jet - fuel

El Jet fuel es un tipo de combustible de aviación diseñado para su uso en aeronaves alimentadas por motores de turbina de gas, los combustibles más comúnmente utilizados para la aviación comercial son de Jet - A y Jet A-1 que se producen a una especificación internacional estandarizada.

El keroseno y el jet fuel están estrechamente relacionados de hecho, el queroseno destinado a la aviación se clasifica como jet fuel. Debe cumplir con ciertos requisitos de calidad para garantizar su seguridad y eficiencia en la aviación. Esto incluye características como un punto de congelación bajo.

#### **IMAGEN 2.**

*Mercado de combustible para aviones de crecimiento por región 2002-2027*



*Fuente: Según la revista Mordo Intelligence*

En la imagen 2 se muestra América del sur y del norte son consumidores medios de combustibles, el mayor consumidor de es rusia y china; Indian Oil Corporation tiene la intención de formar una empresa conjunta con la empresa estadounidense de tecnología de energía limpia LanzaJet Inc y numerosas aerolíneas nacionales para producir combustible de aviación sostenible (SAF).

### **1.1.3 Biocarburantes**

Son biocombustibles líquidos obtenidos a partir de biomasa que se encuentra en estado líquido en condiciones normales de presión y encuentran en estado líquido en condiciones normales de presión y temperatura.

Se emplean en calderas para la producción de calor y electricidad o en motores en combustión interna, en cuyo caso se denominan biocarburantes. Los biocarburantes engloban a todos aquellos combustibles líquidos derivados de la biomasa que tienen características parecidas a gasolina y gasóleos, lo que permite su utilización en motores convencionales sin tener que efectuar modificaciones importantes.

El jet Fuel es tipo de combustible de aviación diseñado para su uso en aeronaves alimentadas por motores de turbina de gas, los combustibles más comúnmente utilizados para el avión comercial son el Jet – A y Jet A-1 que se producen a una especificación internacional estandarizadas.

Para que combustible se considere como alternativo debe ser técnicamente factible, económicamente competitivo, ambiental aceptable, y fácilmente disponible. Una posible alternativa a los combustibles fósiles es el uso de aceites de origen vegetal, grasas animales, aceites usados y semillas de árboles para su conversión en biodiesel. Este combustible es biodegradable y no tóxico y tiene perfil bajo de emisiones en comparación con el diésel de petróleo. El uso del biodiesel permitirá un equilibrio que debe buscarse entre la agricultura., el desarrollo económico y el medio ambiente.

### **1.1.4 El bioetanol**

El bioetanol es obtenido a partir de semillas ricas en azúcares mediante fermentación. Este bioenergético se puede obtener a partir de 4 grandes de las

materias primas, según la facilidad de fermentación en el proceso productivo del biocarburante.

- Alcohol vínico, procedente de la industria vitícola.
- Plantas ricas de azúcares: caña de azúcar, remolacha azucarera, sorgo azucarero, patata.
- Cereales: Cebada, trigo y maíz.
- Material lignocelulósico: hierva, madreca y celulosa.

#### **1.1.4 Biodiesel**

La American Society for Testing and Materials (ASTM), define el biodiesel como esteres mono alquílicos de cadena larga de ácidos grasos. Se encuentra en estado líquido y se obtiene a partir de recursos renovables como aceites vegetales de soya, girasol, palma, como grasas animales y aceite usados, a través de un proceso denominado transesterificación.

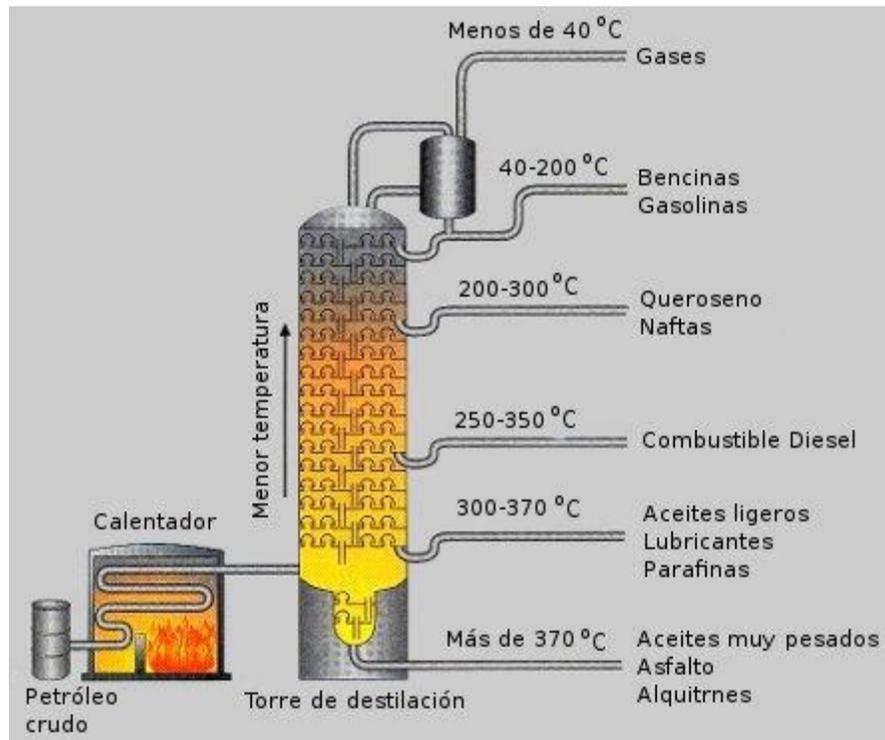
Se considera un combustible alternativo para los motores de combustión interna. Generalmente el biodiesel este compuesto por esteres metílicos de cadena larga (C4-C22) de ácidos grasos como el ácido láurico, palmítico y oleico, además de alcoholes de cadena corta, provenientes del metanol o el metanol.

#### **1.2. PROCESO TRADICIONAL DE OBTENCION DE QUEROSENO**

El queroseno tradicional se obtiene mediante el proceso de destilación separando en recortes del crudo o crudo reconstituido por diferentes puntos de ebullición, como se muestra en la siguiente gráfica:

## GRAFICA 2.

*Producción de keroseno con crudo.*



*Fuente: revista química destialcion*

En la figura 2 se explica la destilación del crudo se calienta en una torre de destilación atmosférica. A diferentes temperaturas, los componentes del petróleo vaporizan y se separan en fracciones. el keroseno se obtiene en la fracción de destilado comprendida entre la gasolina y el Diesel.

Una vez obtenido y tratado, el keroseno se almacena y se distribuye a través de una red de transporte para su uso en diversas aplicaciones, como combustible para aviones, calefacción y otras aplicaciones industriales.

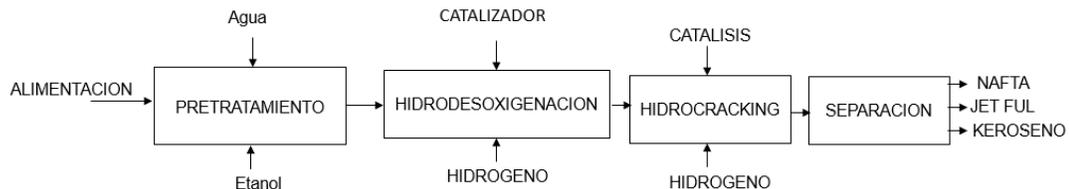
### 1.3. PROCESO PROPUESTO DE OBTENCION DE QUEROSENO

El proceso HEFA (Hidroprocedimiento catalítico de esteres y ácidos grasos), representa una vía más consolidada entre los procesos aprobados y certificados por la

american Society for testing Material (ASTM) para la producción de combustibles alternativos de aviación. A continuación, se muestra la figura 3:

### **GRAFICA 3.**

*Producción de keroseno y Jet fuel a partir de aceites vegetales.*



*Fuente: Revista Agencia Internacional de Energía (AEI), Francia 2020. Pag.35*

El queroseno se ha convertido en los últimos el combustible que nutre el transporte aéreo en Bolivia, en sud América y en el mundo.

Los biocombustibles de aviación hidro procesados son generalmente líquidos parafínicos, libres de compuestos aromáticos y azufre con una longitud de cadena de carbono de C8.

## **1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.4.1 Identificación del problema.**

Según la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), en el año 2020 el volumen de jet Fuel A-1 necesario para satisfacer la demanda interna del país fue de 15.500 m<sup>3</sup>/mes; sin embargo, todo el conjunto de refinerías solo produjo 8.024,1 m<sup>3</sup>/mes, por lo que se tuvo un déficit de 10.302 m<sup>3</sup>/mes el cual fue cubierto por la importación de este combustible.

La capacidad actual de Refinación de la Refinería Gualberto Villarroel es de 35.000 BPD de crudo lo que equivale a 167.197 M<sup>3</sup>/mes y produce 9.000 m<sup>3</sup> al mes de Jet - Fuel lo que equivale a un 5 % de su producción total de contenido. Esto representa un bajo rendimiento y por eso no se llega a abastecer el mercado.

La producción de jet fuel (combustible para aviones) en el país se incrementó en un 7 % en los últimos meses pasando de 2.833 BPD a 3.290 BPD que son procesados en las refinerías de la estatal petrolera para su comercialización en el mercado interno.

La mayor parte de la demanda del Jet Fuel A-1 se aplica por las compras de las aerolíneas comerciales, ya sean de bandera nacional o extranjeras se identifican 3 a 4 aerolíneas que consumen más del 50% de la demanda. El consumo de este combustible se distribuye por las siguientes aerolíneas: BOA, AEROCON, AMAZONAS, ECOJET.

**GRAFICA 4.** Rendimiento y producción promedio  
Volúmenes de La planta de Gualberto Villarroel – Bolivia



<b>RENDIMIENTOS Y PRODUCCION PROMEDIO</b>		
<b>PLANTA DE CARBURANTES</b>	<b>VOLUMEN</b>	<b>UNIDAD</b>
Gasolina Especial	71.000	m3/mes
Diésel Oil	44.800	m3/mes
Gasolina de Aviación	650	m3/mes
Gasolina Súper 91	1.000	m3/mes
Kerosene	1.500	m3/mes
Jet Fuel	9.000	m3/mes
GLP	249	TMD
Crudo Reconstituido	36.000	m3/mes
<b>PLANTA DE LUBRICANTES</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>
Lubricantes	2.300	m3/mes
Grasas	2.500	Kg/mes
Asfaltos	55.000	Kg/mes

*Nota ficha técnica de la Agencia Nacional de hidrocarburos (ANH).*

En la tabla 1. Se muestra los rendimientos y producción promedio de los carburantes total de la planta de Gualberto Villarroel, como la gasolina, Diesel, gasolina de aviación, gasolina super 91, Jet Fuel, keroseno con unidades de m<sup>3</sup> por mes.

La producción de queroseno de las refinerías en Bolivia no abastece a la demanda interna. Estas es una consecuencia de las características del crudo que se explota en el país, puesto que en Bolivia el petróleo es liviano o extra liviano.

El gobierno de Luis Arce autorizó a la estatal Petrolera Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos (YPFB) la importación subvencionada de petróleo crudo para la refinación en Bolivia con objetivos para disminuir la subvención asociada a la importación directa de insumos y aditivos.

Por lo tanto, se necesita emprender procesos optimizados para poder obtener el máximo de recursos a partir del uso mínimo de otros, en nuestro caso obtener la mayor cantidad de queroseno con la mínima cantidad de petróleo que se importa.

## **1.5 OBJETIVOS.**

### **1.5.1 Objetivo general**

- Incrementar nuevos volúmenes de jet fuel a partir de aceites vegetales obtenidos aceites usados, mediante la instalación de un proceso de Hidrocracking en instalaciones en la refinería Gualberto Villarroel.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Diseñar los procesos necesarios para la obtención de Jet – fuel con los parámetros óptimos de calidad tomando en cuenta presión, temperatura, flujos masicos, flujos volumétricos con la programación de Hysys.
- Maximizar el rendimiento de obtención de Jet - Fuel de aviación con la simulación de los parámetros que intervienen en la conversión de aceite reciclado.

- Realizar un análisis de factibilidad técnica y económica del proyecto propuesto.

## **1.6 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

### **1.6.1 Justificación académica**

La producción de biodiésel a partir de aceite vegetales, soya en Bolivia también puede encontrar justificación desde una perspectiva académica, ofreciendo oportunidades para la investigación y la formación en diversos campos. Aquí hay algunas razones académicas para considerar este enfoque:

- La producción de biodiésel a partir de aceites vegetales usado abre oportunidades para la investigación científica en áreas como la ingeniería química, la biotecnología y la ciencia de materiales.
- El proceso de producción de biodiésel ofrece un terreno fértil para el desarrollo tecnológico. Los académicos pueden trabajar en la mejora de los métodos de producción, la eficiencia de los catalizadores y la optimización de los procesos para hacerlos más rentables y sostenibles.
- La producción de biodiésel proporciona una oportunidad para la formación de recursos humanos en disciplinas como la ingeniería química, la biotecnología y la gestión ambiental. Los estudiantes pueden obtener experiencia práctica participando en proyectos relacionados con la producción de biodiésel.
- La implementación de la producción de biodiésel a partir de aceite de cocina usado puede ser un campo de prueba para la transferencia de conocimientos entre académicos y la industria, fomentando la aplicación práctica de la investigación académica.

## 1.6.2 Justificación económica

La justificación económica para la producción de biodiésel en Bolivia puede basarse en varios factores clave que impactan positivamente en la economía del país. Aquí hay algunas razones económicas para considerar la producción de biodiésel en Bolivia:

- La producción de biodiésel representa una oportunidad para diversificar la economía boliviana, que históricamente ha dependido en gran medida de los ingresos provenientes de la exportación de hidrocarburos.

- Al producir biodiésel a partir de fuentes renovables, Bolivia puede reducir su dependencia de los combustibles fósiles importados, mejorando así la seguridad energética y disminuyendo la vulnerabilidad a las fluctuaciones de precios en los mercados internacionales.

- La creación de una industria de biodiésel puede generar empleo en diversas etapas, desde la producción de materia prima hasta la operación de plantas de biodiésel. Esto contribuirá al crecimiento económico y a la mejora del bienestar social.

- La producción de biodiésel a menudo implica el cultivo de cultivos oleaginosos, como la soja o el girasol, que pueden beneficiar a los agricultores locales. Esto promueve la agricultura sostenible y contribuye al desarrollo rural.

- Muchos países están adoptando regulaciones más estrictas en cuanto a la reducción de emisiones y el uso de energías renovables. La producción de biodiésel permitiría a Bolivia cumplir con estas normativas y facilitar el acceso a mercados internacionales comprometidos con la sostenibilidad.

### 1.6.3 Justificación social

La producción de biodiésel a partir de aceite de cocina usado aborda el problema de la gestión de residuos. Este enfoque ayuda a reducir la contaminación ambiental derivada de la disposición inapropiada de aceites usados, promoviendo así prácticas más sostenibles. A continuación, se presenta algunos puntos sociales:

- La implementación de instalaciones de producción de biodiésel puede generar empleo a nivel local, tanto en la recolección de aceites usados como en la operación y mantenimiento de las plantas de producción. Esto contribuye a mejorar las oportunidades de empleo y a fortalecer las comunidades locales.

- La recolección de aceite de cocina usado puede ser gestionada por pequeños negocios locales, cooperativas o incluso a nivel comunitario. Esto fomenta la participación activa de diversos actores en la economía local y apoya el desarrollo de pequeñas empresas.

- La producción de biodiésel a partir de aceite de cocina usado puede servir como una herramienta para aumentar la conciencia ambiental entre la población. Promover la recolección y reciclaje de aceites usados educa a la sociedad sobre la importancia de la gestión sostenible de los recursos y la reducción de residuos.

- La producción y el uso de biodiésel contribuyen a la diversificación de la matriz energética y brindan a la población acceso a una fuente de energía más sostenible. Esto es especialmente relevante en áreas rurales donde puede haber limitaciones en el acceso a fuentes tradicionales de energía.

#### 1.6.4 Justificación ambiental

La utilización de aceite de cocina usado para la producción de biodiésel contribuye a la reducción de residuos contaminantes. El reciclaje de estos aceites evita que se descarguen de manera inadecuada, lo que podría causar daño a los ecosistemas acuáticos y al suelo. A continuación, se presenta algunos puntos ambientales:

- Comparado con los combustibles fósiles, el biodiésel derivado de aceite de cocina usado tiene una menor huella de carbono. Al producir y usar biodiésel, se pueden reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a mitigar el cambio climático.
  
- La producción de biodiésel a partir de aceite de cocina usado puede ayudar a conservar los recursos naturales al disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y la explotación de petróleo crudo.
  
- Al reducir la demanda de petróleo crudo, se puede disminuir la presión sobre los ecosistemas naturales y la biodiversidad, ya que la extracción y producción de petróleo a menudo conlleva impactos negativos en áreas sensibles.
  
- El biodiésel producido a partir de aceite de cocina usado tiene la ventaja de emitir menos contaminantes atmosféricos, como dióxido de azufre y partículas finas, en comparación con los combustibles fósiles convencionales.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 CARACTERÍSTICAS DEL KEROSENO**

El Keroseno es un destilado del petróleo con características específicas que lo hacen adecuado para diversos usos, como combustible para aviones, calefacción y lámparas. Aquí se presentan algunas de las características clave del queroseno:

#### **2.1.1 Punto de ebullición**

El queroseno tiene un punto de ebullición que generalmente se encuentra en el rango de 150 a 300 grados Celsius, dependiendo de la composición específica del queroseno y su grado de refinamiento. Este rango de temperatura es adecuado para aplicaciones como la aviación y la calefacción.

#### **2.1.2 Color**

El queroseno es típicamente incoloro o ligeramente amarillento. La presencia de impurezas, como azufre, puede afectar su color.

#### **2.1.3 Bajo contenido de azufre**

En muchos casos, el queroseno se somete a procesos de tratamiento para reducir su contenido de azufre. Esto es especialmente importante en aplicaciones como la aviación, donde se buscan combustibles más limpios para cumplir con regulaciones ambientales.

#### **2.1.4 Propiedades Fisico-quimicas**

En muchos casos, el queroseno se somete a procesos de tratamiento para reducir su contenido de azufre. Esto es especialmente importante en aplicaciones como la aviación, donde se buscan combustibles más limpios para cumplir con regulaciones ambientales

El Keroseno y otros combustibles de aviación son un blending de diversas corrientes de refinería con el fin de conseguir unas propiedades determinadas marcadas por la normativa vigente. Son mezclas de hidrocarburos:

- Parafinas lineales (n-parafinas)
- Parafinas ramificadas (iso-parafinas)
- Hidrocarburos aromáticos (principalmente alquibencenos y alquilnaftalenos) y olefinas (0,5% - 5% como máximo) con diferentes productos químico. El número de átomos de carbono puede variar en el intervalo de  $C_9$  a  $C_{17}$ .

**TABLA 1.**

*Propiedades de fisicoquímicas de keroseno*

<b>Peso Molecular</b>	<b>media de 170 (C9-C17)</b>
<b>formula molecular</b>	C9-C17
<b>Solubilidad</b>	insoluble en agua (5 mg/l) , miscible con disolventes de petróleo
<b>Punto de fusión</b>	(- 34 °C)
<b>Punto de ebullición</b>	(140/145 – 210/240) °C
<b>Presión de vapor</b>	(2,1-2,6) torr a 21° C
<b>Punto de inflamación</b>	aproximadamente de 38 °C a 52 °C
<b>Límite de explosividad</b>	inferior:1,3% ; superior:6% (concentración en aire)
<b>Umbral de olor</b>	0,6 mg/m3 (0,1 ppm)
<b>Temperatura autoignición</b>	<b>de</b> 177 °C a 329 °C

*Según revista instituto Nacional de seguridad e higiene en el trabajo*

## 2.2 LA SOYA

El consumo promedio de mensual de sub productos de soya se encuentra en santa cruz que tiene 57,4 %, las industrias oleaginosas a nivel nacional ascendieron un numero de 26, considerando que desde el año 2021 al 2023, se incrementa catorce empresas procesadoras de harina expeller y aceite vegetal, de las cuales 22 se encuentran y 4 en Tarija. En la siguiente tabla (2) se muestra la producción de soya en los últimos años 2013 al 2022:

**TABLA 2.**

*Producción de superficie y rendimiento periodo 2013-2022*



*Fuente: INE, MDRyT Requerimiento Sector Pecuario*

Para la gestión 2022, según los datos del MDRyT la producción de soja llegó a 3.53.685 Tm, con una superficie cultivada de 1.490.865 Ha, que se traduce en un rendimiento de 2,4 Tm por Ha.

Si se analiza el complejo de soja en Bolivia, donde se produce también es en las provincias de Ñuflo de chave, chiquitos, guarayos. Obispo Santistevan. En este sentido si, si bien la siembra de dicho cultivo se extiende hacia las provincias del norte de Beni y La Paz, en el centro en Cochabamba y al sur en Chuquisaca y Tarija, presenta una baja producción de la soja.

En la siguiente imagen 3. se muestra la producción de una escala de 0% al 99% de soja en Bolivia, donde le 99 5%se encuentra en Santa cruz:

### **IMAGEN 3**

#### *Producción de soya en Bolivia*



*Fuente: JJ. Hinrichsen S.A. (2021)*

Los conflictos generados entre los países de Ucrania y Rusia, ha derivado en un incremento en los precios de durante el segundo semestre del 2021 y la gestión del 2021 y la gestión 2022, y posteriormente fue bajando levemente. En tanto los precios de grano de soya en Bolivia se mantuvo por debajo de los precios de Chicago y Rosario.

### **2.3 COMBUSTIBLE EN EL SECTOR DE AVIACION**

En Bolivia, el combustible de aviación es suministrado por YPFB Aviación, una empresa subsidiaria de YPFB. YPFB Aviación vende y distribuye combustible de aviación (Jet Fuel y AV Gas) en todo el país. La empresa opera bajo altos estándares de calidad y seguridad, tanto a nivel nacional como internacional.

La estatal petrolera, a través de su subsidiaria YPFB Aviación, tiene a su cargo el abastecimiento y distribución de combustibles de aviación (Jet Fuel y Av - Gas) en 13 aeropuertos en todo el territorio nacional. Mantiene operaciones en las ciudades de

La Paz, Cochabamba, Sucre, Oruro, Tarija, Yacuiba, Santa Cruz (Trompillo y Viru Viru), Puerto Suarez, Trinidad, Riberalta, Guayaramerín y Cobija. Además, están en construcción las plantas en Uyuni y Chimoré.

En Bolivia hay 37 aeropuertos que están bajo la administración y control de AASANA, pero sólo 12 de estos cuentan con tanques de almacenamiento de combustible para proveer jet fuel A-1 o AVGAS 100-130 (en algunos casos) a las aeronaves.

El Jet Fuel lo utilizan las líneas comerciales aéreas de mayor tamaño y prácticamente representa cerca del 95% de consumo en Bolivia, y que la gasolina de aviación es utilizada por las avionetas, es decir, naves pequeñas. Dijo que a nivel nacional el consumo de combustible básicamente es Jet Fuel para las aerolíneas comerciales que, en volumen, representa tal vez menos del 5% del total de combustibles fósiles que se utilizan a diario en el parque vehicular.

#### **IMAGEN 4.**

*Control de tanques de almacén de Jet Ful avión*



*Fuente: revista de YPPB*

En la imagen 4. se muestra que personas están verificando y controlando el suministro del combustible de aviación. La empresa Air BP (British Petroleum) junto con la agencia de nacional de hidrocarburos (ANH) inspecciona la asignación de

terrenos de la administración de Aeropuertos y servicios auxiliares de navegación Aérea.

El tipo de Jet -A es esencialmente una mezcla de fracciones de queroseno producto de la destilación del petróleo. Tiene un punto de inflamación de 43 a 66 °C y un punto de congelación de -40 °C. la equivalencia militar de Jet – A.

El tipo de JetA-1 es también una mezcla de fracciones de queroseno y tiene muy pequeñas diferencias físicas con el tipo de Jet A, Tiene un punto de congelación de -50 °C y un punto de inflamación de 43 °C, es la equivalencia de militar de Jet A-1 en el JP-1.

## **2.4 ACEITE VEGETAL**

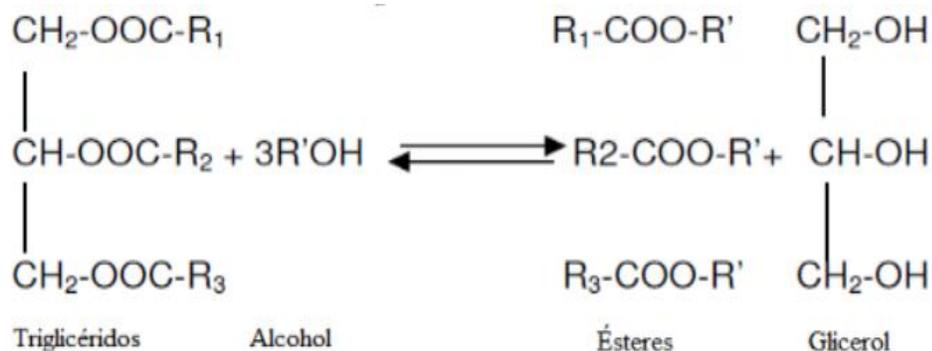
Los aceites y las grasas se diferencian principalmente en su contenido en ácidos grasos. Los aceites con proporciones altas de ácidos grasos insaturados, como el aceite de girasol mejoran la operatividad del biodiesel a altas temperaturas, pero disminuyen su estabilidad de oxidación, que se traduce en índice de yodo elevado.

Por este motivo se pueden tener en consideración, como materias primas para producir biodiesel, los aceites con elevados contenidos de insaturaciones, que han sido modificados genéticamente para reducir esta proporción, como el aceite de girasol de alto oleico.

La transesterificación o alcoholisis de nominada así por utilizar un alcohol de cadena corta como metanol, se refiere al desplazamiento del radical del alcohol por otro proveniente de un éster suministrado por los triglicéridos de grasas animales o vegetales, en un proceso similar a la hidrólisis, a excepción de que se utiliza alcohol en lugar de agua.

### IMAGEN 5.

Ecuación general de la reacción de triglicéridos



Según la revista de licenciatura Parawira, 2015

Los álcalis más utilizados son el hidróxido sodio, hidróxido de potasio, y carbonatos. Los catalizadores ácidos habituales son ácido sulfúrico, ácido sulfónico, ácido clorhídrico, los productos son una mezcla de ésteres, glicerol alcohol catalizador y tri- y di- y mono glicerina se asienta en el fondo del recipiente de reacción. La formación de diglicéridos y monoglicéridos son un paso intermedio en el proceso

### IMAGEN 6.

Mecanismo de reacción triglicéridos



Según la revista de licenciatura Parawira, 2015

#### 2.4.1 Características físicas de aceite de reciclado

##### 2.4.1.1 Densidad

La densidad del aceite de fritura usado es de 0,92 g/ml. Después de convertirlo en biodiesel, su densidad es de 0,88 g/ml.

Para su densidad absoluta en  $\text{kg/m}^3$ , solo necesitamos saber la densidad del agua a  $20^\circ \text{C}$ , que es del orden de  $998,30 \text{ kg/m}^3$ . Simplemente multiplicando la densidad relativa del aceite por la densidad del agua obtenemos la densidad absoluta del aceite en  $\text{kg/m}^3$ .

#### **2.4.1.2 Punto de vaporización (destilación atmosférica)**

Esta propiedad se relaciona con la composición de la gasolina, su volatilidad y su presión de vapor. Indica la temperatura a la cual se evapora un porcentaje determinado de gasolina, tomando una muestra de referencia. Esto se realiza empleando el procedimiento descrito en la norma ASTM D-86.

#### **2.4.1.3 Contenido de azufre**

Esta propiedad se encuentra altamente relacionada con la cantidad poseída de azufre (S) presente en el producto. Dentro de la cantidad, se encuentran determinados promedios y estadísticas en la cual en producto no puede sobrepasar o resaltar, ya que si esto sucede la gasolina puede tener efectos corrosivos sobre las partes metálicas del motor y sobre los tubos de escape. A su vez, al salir por el tubo de escape, esta produce un alto grado de contaminación en el ambiente, produciendo a su vez las conocidas lluvias ácidas.

Las especificaciones de azufre en las gasolinas están limitadas a 0.1% en masa. Su determinación se basa en el método establecido en la norma ASTM D2622. Adicionalmente el efecto corrosivo que pueda ocasionar se determina con el ensayo de Corrosión a la Lámina de Cobre (ASTM D-130).

#### **2.4.1.4 Research Octane Number (RON)**

El valor del RON, nos da a conocer el comportamiento de la gasolina en un motor corriendo a una baja velocidad de 600 revoluciones por minuto (rpm) y a una temperatura (entrada) de aire de 51,7 o C. El ensayo empleado para la determinación del RON se realiza mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM D-2699.

#### **2.4.1.5 Tiempo de reacción**

El valor del MON, nos da a conocer el comportamiento de la gasolina en un motor corriendo a una alta velocidad de 900 revoluciones por minuto (rpm) y a una temperatura (entrada) de aire de 149 o C.

El ensayo empleado para la determinación del MON se realiza mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM D-2700.

### **2.5 CALIDAD DEL BIODIESEL**

La empresa Bosch realizo un detallado estudio sobre los problemas causados por el uso de biodiesel últimos años. Las fallas reportadas en motores adecuados para el uso de biodiesel, están relacionadas con falta de calidad biocombustible, destacando la importancia de contar con un sistema de control de calidad efectivo para la producción de biodiesel. Este es un aspecto importante que determina el funcionamiento y vida útil de los equipos de inyección de combustibles en motores Diesel.

Cada falla de motores producida por el uso de biodiesel en motores Diesel contribuye a una insatisfacción de los consumidores, además destruye todas las características positivas que tiene el combustible. Para lograr los estándares de calidad requeridos para el uso y distribución del biodiesel, los países en este ramo han publicado sus propios estándares, destacando los ASTM para los Estados unidos, EN para unión europea y las DIN para Alemania.

A continuación, se detallan la composición de algunas gasolinas en la industria:

**TABLA 3.**

*Componentes de las gasolinas*

<b>Componentes de la gasolina (%)</b>					
<b>OCTANAJE</b>	<b>Parafinas</b>	<b>Isoparafinas</b>	<b>Aromáticos</b>	<b>Naftalenos</b>	<b>Oleofinas</b>
Octanaje 87	9,59	38,34	38,61	6,1	7,36
Octanaje 89	9,06	38,13	43,36	3,84	5,6
Octanaje 92	7,48	39,68	43,36	3,26	6,22
JP-4 Jet	29,34	31,02	23,9	13,16	2,58
P. Aviación	3,33	74,22	21,92	0,51	0,01

*Fuente: Según derivados del Petróleo, CONOE, 2020*

ASTM en inglés American society for testing and Materials, lo importante que viene a decir, Sociedad Estadounidense para pruebas y materiales. Es una organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios por consenso, aplicables a materiales, productos, sistemas y servicios.

Los estándares más importantes para verificar la calidad del biodiesel son la norma ASTM D 6584 y la norma ASTM 1D6751-09 para los estados unidos, En la Tabla 3 se muestran los parámetros y límites establecidos para parámetro.

**Tabla 4.** Lista de ASTM para determinar la calidad del biodiesel

<b>PROPIEDADES</b>	<b>MÉTODO ASTM</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>ESPECIFICACIÓN</b>	
			<b>MÍNIMO</b>	<b>MÁXIMO</b>
<b>Densidad a 15°C</b>	D 6751-09	Kg/m <sup>3</sup>	800	<b>960</b>
<b>Viscosidad Cinemática a 40°C</b>	D 445	mm <sup>2</sup> /s	1.9	<b>6.0</b>
<b>Número de Cetano</b>	D 613	Cetanos	47	

<sup>1</sup> Norma ASTM, American Society for testing and Materials, Haupt Bockey & Wilharm,

<b>Índice de yodo</b>	EN 14111	gr yodo/100 g	-	<b>120</b>
<b>Contenido de monoglicéridos</b>	D 6584	% masa	-	<b>0.80</b>
<b>Contenido de diglicéridos</b>	D 6584	% masa	-	<b>0.20</b>
<b>Contenido de triglicéridos</b>	D 6584	% masa	-	0.20

*Según la revista chemica of Haupt, Bockey, & Wilharm, 2016*

Para poder utilizar el biodiesel en motores es necesario que cumpla con ciertas características o propiedades de tal manera que efecto no sea más perjudicial que el Diesel. Las propiedades del biocombustible deben ser similares a las del Diesel convencional y puede ser utilizado como sustituido o en mezclas.

## **2.6 REACCIONES DEL HYDROCRACKING**

Hidrocracking es un proceso de refinamiento con catalizador versátil que requiere como fuente de alimentación un crudo pesado agregándole hidrogeno, mientras quita las impurezas y craquea a un rango de ebullición deseado.

Aunque la hidrogenación es una de los procesos catalíticos más antiguos utilizados en el refinado del petróleo, solo en los recientes años el Hidrocracking catalítico se ha desarrollado en gran magnitud en el mundo, el interés es causado por varios factores, los cuales son: (1) la demanda de productos de petróleo ha cambiado a proporciones altas, (2) el hidrogeno, en grandes cantidades y bajo costo se encuentra disponible para este tipo de operaciones, y (3) las preocupaciones medioambientales que limitan las concentraciones de azufre y aromáticos en los combustibles han aumentado.

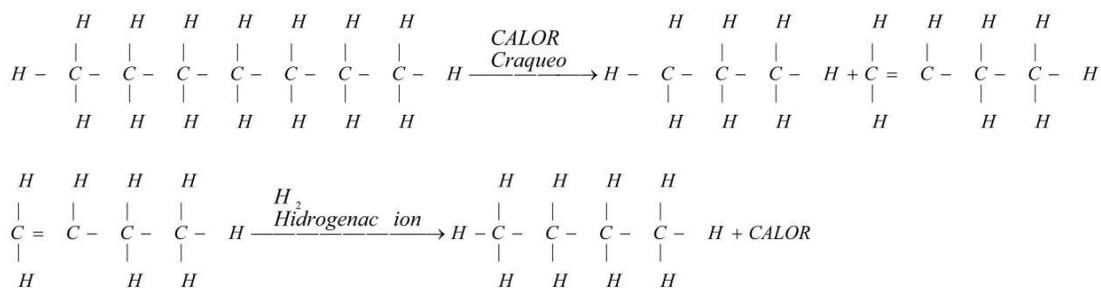
Algunas de las ventajas del Hidrocracking son:

- El rendimiento de Gasolina y Diésel Oíl es mayor.
- Mejora la calidad del Diésel Oíl y Gasolina.
- Se puede obtener combustibles más ligeros y de mayor costo a partir de compuestos pesados.

Aunque hay centenares de reacciones químicas simultaneas que ocurren en un proceso de Hidrocracking, es de opinión general que el mecanismo que es de cracking catalítico con hidrogenación superpuesta. El craqueo catalítico es el corte de un enlace simple carbono-carbono, y la hidrogenación es la adición de hidrogeno a un doble enlace carbono-carbono.

### IMAGEN 7.

#### Mecanismo de Hidrocracking



Según la revista Handbook, 2019

Esto muestra que el craqueo y la hidrogenación son complementarios, el craqueo provee olefinas para la hidrogenación, mientras que la hidrogenación mantiene el calor para el craqueo. La reacción de craqueo es endotérmica y la reacción de hidrogenación es exotérmica. La reacción global proporciona un exceso de calor, porque las reacciones exotérmicas de hidrogenación desprenden una mayor cantidad de calor del que consumen las reacciones endotérmicas de craqueo. Este excedente

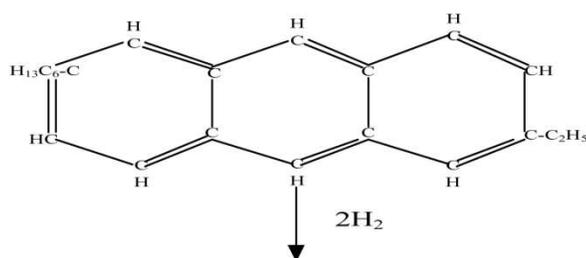
de calor causa un incremento de temperatura del reactor y acelera la velocidad de reacción. Esto puede ser controlado inyectando hidrogeno frio como enfriador en los reactores para absorber el exceso de calor en la reacción.

Otra reacción que ocurre e ilustra el funcionamiento complementario de la hidrogenación y las reacciones de craqueo es la reacción inicial de un compuesto aromático condensado a un ciclo parafina. Esto permite posteriormente craquear para proceder a una magnitud mayor y así convertir un componente de del crudo cíclico catalítico de bajo valor a un producto de mayor valor.

Isomerización es otro tipo de reacción que ocurre en el Hidrocracking y acompaña la reacción de craqueo. Se hidrogenan los productos olefínicos formados rápidamente, así se mantiene una concentración alta de isoparafinas de alto octano y previniendo una reacción inversa para la cadena lineal de moléculas. Un punto interesante en relación al Hidrocracking de estos compuestos son las cantidades relativamente pequeñas de propano y materiales livianos que producen: son comparados con los procesos de craqueo normales.

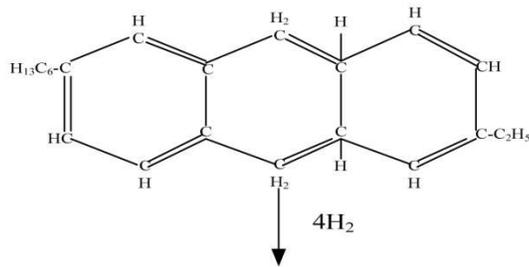
### **IMAGEN 8.**

#### *Reacciones Típicas del Hidrocracking*

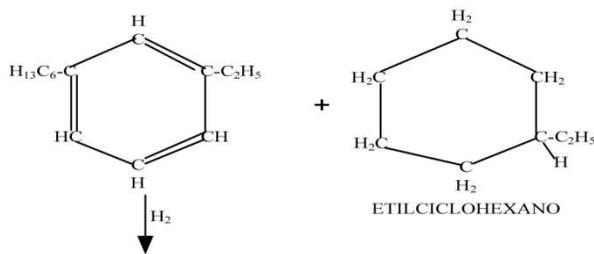


*Según la revista Handbook, 2019*

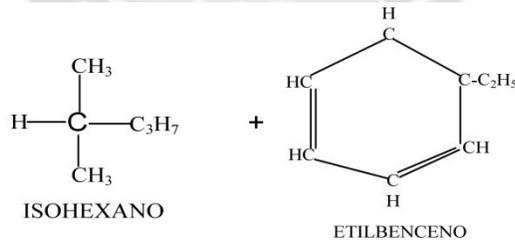
Saturación parcial:



Apertura y separación de anillos



Isomerización y cadena lateral de hidrocracking:



Según la revista Handbook, 2019

Las reacciones de Hidrocracking normalmente se llevan a cabo en medio de las temperaturas del catalizador entre 550 y 750 °F (290 a 400°C) y las presiones del reactor entre 1200 y 2000 psi (8275 y 13800 kPa). La circulación de grandes cantidades de hidrogeno con el flujo de carga previene la excesiva contaminación del catalizador y permite largos periodos sin la regeneración del catalizador. También es necesaria la preparación cuidadosa de la carga para evitar el envenenamiento y prolongarla vida del catalizador por más tiempo. Frecuentemente el flujo de carga es hidrogenado para quitar el azufre y el nitrógeno que contiene, así como los metales

antes de que se envíe a la primera fase del Hidrocracking, o a veces el primer reactor en el tren de reactores puede usarse para este propósito.

Las reacciones de Hidrocracking ocurren bajo alta presión parcial de hidrogeno y en la presencia de un catalizador dual, hidrogenación y craqueo. El exceso de hidrogeno inhibe la formación de residuos pesados por reacción de los productos de craqueo e incrementa el rendimiento de destilados; la producción neta es la mezcla de parafinas naftenos y aromáticos.

### **2.6.1 Temperatura del Catalizador**

La cantidad de conversión que tiene lugar en los reactores va a ser determinada por varias variables: tipo de carga, cantidad de tiempo que la carga está en presencia del catalizador, presión parcial del hidrógeno en el lecho del catalizador, y, lo más importante, la temperatura del catalizador y reactantes. La generalización obvia sobre la temperatura es que, a más alta temperatura, más rápida la proporción de reacción y por consiguiente, más alta conversión. Desde que el hidrocracking es exotérmico global, la temperatura aumenta como la carga y gas de reciclo procede a través de las camas del catalizador

Elevadas y descontroladas temperaturas (altas) pueden causar el daño al catalizador y/o a los reactores. Los cambios de temperatura son dependientes del tipo de carga, el tipo de catalizador, y varía del proveedor del catalizador. El mismo incremento de temperatura de lecho máximo también se recomienda para la mayoría de los reactores de pre tratamiento. Para controlar bien las reacciones como los reactantes que pasan a través del lecho del catalizador, no es suficiente medir simplemente la temperatura de la corriente de fluido a la entrada y salida de cada lecho y/o el reactor. Es necesario observar la temperatura a la entrada, salida, y radialmente a lo largo de la cama del catalizador.

## 2.6.2 Conversión

El término "conversión" normalmente se define como:

$$\text{La conversión, \%vo} = \frac{\text{Flujo de Carga Fresca}}{\text{Fondo del Fraccionador} + \text{Flujo de Carga Fresca}} * 100$$

Donde:

FCF= Flujo de Carga Fresca, BPD o m<sup>3</sup>/h; Fondo Frac =Fondo Neto del Fraccionador producto para almacenamiento, BPD o m<sup>3</sup>/h.

La conversión es útil como una medida de la severidad del funcionamiento. Requiere la severidad más alta (significa la temperatura más alta del catalizador) para ir a los niveles de la conversión más altos y la severidad más alta para reducir el punto final del producto a una conversión constante. La conversión normalmente se controla por la temperatura del catalizador.

## 2.6.3 Calidad de la Carga Fresca

La calidad del aceite crudo cargada a un Hidrocracking afectará la temperatura requerida en la cama del catalizador para alcanzar la conversión deseada, la cantidad de hidrógeno consumió en el proceso, la longitud de tiempo antes del catalizador se desactiva, y la calidad de productos.

## 2.6.4 Azufre y Compuestos de Nitrógeno

En general, aumentando la cantidad del contenido de nitrógeno orgánico y compuestos de azufre de la carga aumenta la severidad de la operación. El contenido de azufre del alimento para una carga de gas de vacío puede variar a tan alto como 2.5 a 3.0% peso. El nivel más alto de azufre causará un aumento en el contenido de H<sub>2</sub>S correspondiente al gas de reciclado normalmente tendrá pequeño o ningún efecto en la actividad del catalizador.

### 2.6.5 Volumen de Hidrógeno

La cantidad de compuestos no saturados (como las olefinas y aromáticos) contenidos en la carga tendrá un efecto en el calor durante la reacción y en el consumo total de hidrógeno en la unidad.

### 2.6.6 Catalizador en permanente Envenenamiento

Se descompondrán compuestos órgano-metálicos contenidos en la carga y los metales se retendrán en el catalizador, mientras disminuye así su actividad. Los metales normalmente no son trasladables por la regeneración oxidativa, una vez que han envenenado el catalizador su actividad no puede restaurarse. Por consiguiente, el contenido de metales en la carga es una variable crítica que debe controlarse cuidadosamente. Los naftenos de hierro son solubles en el aceite y serán un veneno para el catalizador.

### 2.6.7 Líquido Reciclado

Muchos Hidrocracking son diseñados para reciclar la carga no convertida del fondo de los fraccionadores atrás de los reactores. Esta corriente normalmente es material destilado sobre el producto más pesado del corte lateral del fraccionador. Para un producto destilado de Hidrocracking, la corriente de reciclo normalmente es un 600-700° F (315-370° C) más diésel pesado. Esta variable se llama Razón de carga combinada (CFR), y se define como:

$$CFR = \frac{Tasa\ Carga\ Fresca + Tasa\ Líquido\ reciclado}{Tasa\ Carga\ Fresca}$$

### 2.6.1 Reformado

La reformación catalítica es un proceso químico utilizado en el refino del petróleo. Es fundamental en la producción de gasolina. Su objetivo es aumentar el número de octano de la nafta pesada obtenida en la destilación atmosférica del crudo.

Esto se consigue mediante la transformación de hidrocarburos parafínicos y nafténicos en isoparafínicos y aromáticos. Estas reacciones producen también hidrógeno, un subproducto valioso que se aprovecha en otros procesos de refino.

Para ello se utilizan altas temperaturas (490-530 °C), presiones moderadas (10-25 bar) y catalizadores sólidos de platino y otros metales nobles soportados sobre alúmina.

Este proceso se lleva a cabo en unidades diseñadas al efecto y que con frecuencia adoptan nombres registrados. Otras empresas de ingeniería también licencian este proceso (p.ej. el antiguo Instituto Francés del Petróleo, que ahora se llama Axens) y algunas de las grandes empresas del petróleo disponen de diseños propios.

Las unidades de reformado catalítico constan generalmente de tres secciones fundamentales:

- Hidrotratamiento de nafta
- Reformado catalítico propiamente
- Estabilización y fraccionamiento

#### **2.6.1.1 Hidrotratamiento de nafta**

Tiene como objetivo eliminar el azufre y nitrógeno de la nafta pesada. Es imprescindible dado que son venenos para el catalizador de platino. La nafta pesada se mezcla con hidrógeno.

La unidad consta de depósito y bomba de carga, tren de precalentamiento, horno, reactor en lecho fijo con catalizador sólido tipo cobalto/molibdeno sobre alúmina.

El efluente del reactor, una vez recuperada parte de su energía en el tren de precalentamiento de la carga, se enfría en un aerorefrigerante y se envía al separador de alta presión (depende la base de diseño puede ser uno o dos separadores de alta). De allí pasa a la columna de stripping donde se eliminan por cabeza los gases producto de la reacción ( $H_2S$ ,  $NH_3$ ,  $H_2O$ ). La nafta pesada desulfurada sale por el fondo de la columna de stripping y es alimentada a la unidad de reformado propiamente dicha.

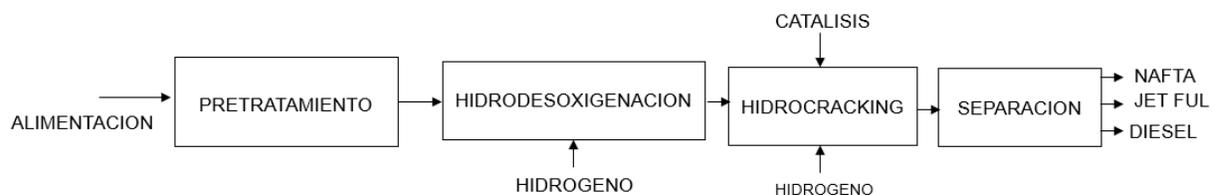
## 2.7 HIDROPROCESAMIENTO CATALÍTICO DE ESTERES Y ÁCIDOS GRASOS (HEFA)

El proceso de HEFA representa una vía más consolidada entre los procesos aprobados y certificados por la American Society for Testing and Materials (ASTM) para la producción de combustibles alternativos de aviación.

El proceso HEFA convierte acilgliceroles (esteres) y ácidos grasos en hidrocarburos para producir biocombustibles para avión en presencia de hidrogeno, para la eliminación del átomo de oxígeno de la materia prima. Los biocombustibles para aviación hidroprocesados son generalmente líquidos parafínicos, libres de compuestos aromáticos y azufre, con una longitud de cadena de carbono  $C_8H_{18}$ .

### IMAGEN 9.

*HEFA para la producción de biocombustibles para aviones*



*Según la revista de licenciatura MDPI, Basilea*

En la figura 2.21, se puede incluir hidrocrqueo e hisomerizacion de la materia prima, con el objetivo de cumplir con los estándares para combustibles alternativos de aviación abordados por la ASTM. En el escenario brasileño se dedican a reciclar todo

tipo de aceites de cocina desechables para la producción de biocombustibles de aviación debido a su menor costo.

En EEUU es uno de los mercados más grandes para la industria de la aviación y el combustible de la aviación renovable. Utilizan este proceso hidroporcesamiento catalítico de esteres y ácidos grasos para su elaboración de bioqueroseno para su consumo y demanda de sus aviones. Entre 1978 al 2022, las aerolíneas estadounidenses mejoraron la eficiencia del combustible en más de un 130%.

## **2.8 PROCESOS COMERCIALES**

Actualmente existen varias empresas extranjeras que ya comercializan el proceso de hidrocracking de aceite vegetal para la generación de diésel renovado y bioqueroseno. Una de las empresas pioneras en la industria del combustible sintético es la compañía NESTE OIL en Porvo, Finlandia quienes usan aceite vegetal como materia prima, cuenta con otra planta de Singapur que usa un proceso denominado Next Generation Biomass Too Liquid (NExBTL) que produce más de 800.000 toneladas anuales de diésel renovable a partir de materias primas como aceite de palma y grasas animal de residuo.

Ellos obtienen un diésel renovable con de cetano 84-99, libre de oxígeno, nitrógeno y compuestos aromáticos; los alcanos formados pasan por otra etapa de hidroisomerización y hidrocracking para mejorar las propiedades de flujo en frío.

En Norco, Louisiana se encuentra la planta Diamond Green Diesel con capacidad de más de 130 millones de galones por año. The CanMet Energy Technology Center of the Natural Resource of Canadá company en el país Canadá usa catalizadores NiMo-CoMo con rendimiento del 70-80% de diésel con número de cetano de 100 y poca concentración de azufre (<10 ppm).

Nippon Oil Corporation (NOC) es una empresa petrolera japonesa con sede en Tokio. En los últimos años, la empresa ha estado expandiendo sus operaciones a otros

países. Con Toyota Motror Corp Trabajan conjuntamente en Bio Hydrofined Diesel (BHD) para obtener diésel con numero de cetona a 101 a través de aceite de palma y aceite usado. En la tabla (5) se presentan algunas otras plantas industriales que hacen uso de proceso hidro cracking con diferentes materias primas.

**TABLA 5.**

*Procesos comerciales para la producción de Jet Fuel renovable*

<b>Compañía</b>	<b>País</b>	<b>Materia Prima</b>
<b>Petrobras</b>	Brasil	Aceite vegetal/ grasa animal
<b>Dynamioc Fuels Syntroleum/Tyson</b>	Estados Unidos	Grasas animales no alimenticias
<b>UOP and ENI</b>	Italia	Aceite vegetal
<b>British Petroleum</b>	Australia	Aceite vegetal/ Grasa co-procesado con petróleo Diesel
<b>Conoco Phillips/Tyson</b>	Irlanda	Aceite vegetal/ Grasa co-procesado con petróleo Diesel

*Según la revista científica biocombustibles*

Los combustibles de aviación utilizan en mezclas con 50% de combustibles derivado de petróleo y es de gran relevancia hoy en día en vuelos comerciales. La Ecofinig Process junto China, India y los Emiratos Árabes Unidos desarrollan un proceso de tecnología de combustible verde aviación basándose en el proceso de hidrocracking y Hidrodesoxigenacion, realizando también un procesamiento de isomerización para obtener diésel con buenas condiciones de flujo en frio.

En 2022, la empresa estadounidense World Energy lanzó la primera planta comercial de bioqueroseno a partir de aceites reciclados utilizando el proceso de hidrocracking

## **CAPITULO III “METODOLOGIA DE OPTIMIZACIÓN”**

### **3.1 INTRODUCCION.**

En este capítulo se enfocara las teorías matemáticas para obtener los puntos máximos, mínimos y óptimos de funciones. Estas teorías comprenden métodos para optimizar una función, que en el proximo capítulo se aplicara para obtener los valores mínimos de la producción de Jet fuel incluyendo los costos. El modelo se basa en el principio del máximo y minimos con análisis de la Matriz Hessiana, se puede ver un detalle del principio en ANEXOS B.

El proceso de obtención de bioqueroseno a partir de aceite de cocina en una simulación con HYSYS (un software de simulación de procesos) implica varias etapas. A continuación, te presento una metodología general que podrías seguir. Ten en cuenta que los detalles específicos pueden variar según las condiciones y los objetivos particulares de tu proyecto. Además, es importante señalar que la simulación en HYSYS puede ser un proceso complejo y es recomendable contar con experiencia en el software y en procesos químicos.

Configurar yn modelo detallado de del proceso en el software de la simulacion para evaluar el comportamiento de bajo diferentes condiciones de presion y temperatura.

Esta metodología proporciona una visión general y estructurada del proceso, pero es crucial adaptarla según los detalles específicos del sistema y los objetivos del proyecto. Además, se recomienda contar con experiencia en HYSYS y conocimientos especializados en química de procesos y bioquímica.

### **3.2 CARACTERISTICAS DEL ACEITE**

Estas moléculas, que contienen carbono, hidrogeno y oxigeno, presnetan una estructura que les confiere propiedades lubricantes y resistencias al calor. Además,

pueden ser derivados de fuentes naturales, como las plantas, o sintetizados en laboratorio.

Los aceites se clasifican en diferentes tipos según su origen y características, como por ejemplo aceites vegetales, como el aceite de girasol y el aceite de oliva, se obtiene utilizan ampliamente en la cocina y en la industria alimentaria.

El aceite de cocina suele contener ácidos grasos, que pueden ser saturados, insaturados (monoinsaturados o poliinsaturados) o trans. La proporción de estos ácidos grasos puede afectar la salud cardiovascular.

Cada tipo de aceite tiene un sabor y aroma característicos. El aceite de oliva, por ejemplo, tiene un sabor distintivo que puede variar según la variedad y la región de producción.

El color del aceite puede variar según su tipo y grado de refinación. Por ejemplo, el aceite de oliva virgen extra tiene un color verde dorado característico debido a su contenido de clorofila.

Algunos aceites, como el aceite de linaza, son ricos en ácidos grasos omega-3, que son beneficiosos para la salud. La proporción entre los ácidos grasos omega-3 y omega-6 puede ser relevante en términos de nutrición.

Algunos aceites pueden contener vitaminas liposolubles, como la vitamina E. El aceite de oliva, por ejemplo, es conocido por sus propiedades antioxidantes debido a su contenido de vitamina E y polifenoles.

**TABLA 6.**

*Normas para determinar las propiedades de aceite vegetal*

<b>Propiedades</b>	<b>Unidades</b>	<b>Normas</b>	<b>Exactitud</b>
<b>Viscosidad cinemática 40 °C</b>	mm <sup>2</sup> /s	ASTM D 445-09	±0,01

<b>Densidad a 15 °C</b>	kg/m <sup>3</sup>	ASTM D 1298-99	±0,1
<b>Índice de acidez</b>	mg KOH/g	ASTM D 664	±0,000 1
<b>Temperatura de inflamación</b>	°C	ASTM D 93	±0,1
<b>Índice de Yodo</b>	mg I <sub>2</sub> /g	EN 41111	±0,1

*Según la revista cubana de química*

En la tabla se muestra propiedades fisicoquímicas del aceite vegetal de sus propiedades cinéticas a 40 °C, su densidad, el índice de ácidos y la temperatura de inflamación.

### 3.2.1 Característica de la soya

El aceite de soya es un aceite virgen de alta calidad adecuado para la cocina, el aceite de cocina usado es el resultado de su exposición a alimentos y calor, y su calidad disminuye con el tiempo. Es importante manejar y desechar adecuadamente el aceite de cocina usado para evitar problemas ambientales y de salud.

La principal diferencia entre el aceite de soya y el aceite de cocina usado radica en su estado y composición después de haber sido utilizado en la preparación de alimentos. Aquí hay algunas diferencias clave:

- El aceite de soya es un aceite vegetal virgen que se extrae de las semillas de soya mediante procesos de prensado o extracción química.
- Su composición del aceite es puro y limpio con una composición específica de ácidos grasos y nutrientes, y es adecuado para una variedad de usos en la cocina.
- El aceite de cocina usado debe ser gestionado adecuadamente para evitar problemas ambientales. Puede ser reciclado para la producción de biocombustibles o eliminado de manera segura.

**TABLA 7.**

*Viscosidad dinamica de los aceites vegetales*

<b>ACEITE</b>	<b>DENSIDAD 40 °C (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>VISCOSIDAD CINEMATICA 40 °C (MM<sup>2</sup>/S)</b>	<b>VISCOSIDAD DINAMICA 40 °C (N-s/m<sup>2</sup>)</b>
<b>Soya</b>	897	32,40	0,0292
<b>Girasol</b>	903	28	0,0257

*Según la revista cubana de química*

El aceite de soja contiene proporciones considerables de ácido oléico, ácido linoleico. Hay pequeñas cantidades de ácido palmítico, linolénico, estearico y trazas de ácido palmítico y ácido mirístico. Esta composición determina la relación entre ácidos grasos saturados e insaturados.

### **3.3 METODO MATEMATICO PARA MAXIMIZAR Y MINIMIZAR.**

Definir un modelo matemático para ver la forma cómo se relacionan las variables. Un modelo matemático es la representación matemática de aspectos esenciales de un sistema y que se presenta conocimiento del mismo de una manera útil (Eykhoff, 1974).

Se establece que la optimización consiste en la búsqueda de un grupo de variables manipulables con la finalidad de maximizar o minimizar una característica de un sistema. Desde un punto de vista de Ingeniería, la optimización es posible cuando se modela la característica deseable del sistema.

Para encontrar puntos máximos y mínimos en funciones matemáticas que involucren presión (P), temperatura (T), y flujo másico (m), se pueden utilizar métodos de cálculo diferencial. A continuación, te presento un ejemplo de una función que relaciona estas variables y cómo encontrar puntos críticos y determinar su naturaleza.

**Ejemplo:** Funcion presion, temperatura y flujo masico:

Supongamos que tenemos la siguiente función matemática que describe la relación entre la presión (P), la temperatura (T), y el flujo másico (m) en un sistema:

$$F(P, T, m) = P^2 + 2T^3 - 0.1m^2 + 100$$

- Derivadas Parciales:

Encontrar las derivadas parciales de  $(F)$  con respecto a cada variable:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial P} \right|, \quad \left. \frac{\partial f}{\partial T} \right|, \quad \left. \frac{\partial f}{\partial m} \right|$$

Supongamos que las derivadas parciales son:

$$\frac{\partial f}{\partial P} = 2P, \quad \frac{\partial f}{\partial T} = 6T^2, \quad \frac{\partial f}{\partial m} = -0.2m$$

- Puntos Críticos:

Igualamos las derivadas parciales a cero y resolvemos para P, T, m:

$$2P = 0 \quad \Rightarrow \quad P = 0 \dots\dots (2)$$

$$6T^2 = 0 \quad \Rightarrow \quad T = 0 \dots\dots (3)$$

$$-0.2m = 0 \quad \Rightarrow \quad m = 0 \dots\dots (4)$$

Por lo tanto, el unico punto critico es

- Análisis de la Matriz Hessiana:

- Se calcula la matriz hessiana utilizando las derivadas parciales segundas:

$$H = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\partial g}{\partial x} & -\frac{\partial g}{\partial x} \\ -\frac{\partial g}{\partial x} & -\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} & -\frac{\partial^2 g}{\partial y \partial x} \\ -\frac{\partial g}{\partial y} & -\frac{\partial^2 g}{\partial x \partial y} & -\frac{\partial^2 g}{\partial y^2} \end{bmatrix}$$

- Evaluamos la matriz hessiana en el punto crítico (P = 0, T = 0, m = 0) y determinamos su naturaleza.

$$H(0,0,0) = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.2 \end{bmatrix}$$

- Analisis de la matriz:

La teoría del Hessiano se fundamenta en las siguientes condiciones:

1. Si  $|H| > 0$  entonces  $v_0$  es un máximo local en  $f$  limitada a  $S$
2. Si  $|H| < 0$  entonces  $v_0$  es un mínimo local en  $f$  limitada a  $S$
3. Si  $|H| = 0$  entonces el criterio no concluye nada

Este ejemplo es simplificado y la aplicación de estos pasos dependerá de la función específica que describa la relación entre la presión, la temperatura y el flujo másico en el sistema que estás analizando.

### **3.4 DISEÑO Y SIMULACION DE LA COLUMNA**

#### **3.4.1 Aspectos generales de la columna**

Al utilizar la simulación como la herramienta para el diseño de una columna para el aceite vegetal, la columna de destilación consiste en un espacio para que hagan contacto las corrientes de vapor y el líquido con el propósito de que se efectúe una transferencia de masas entre las dos fases, si bien el contacto de las fases en general se lleva a cabo mediante una serie de platos, estas columnas se utilizan cada vez más en la industrias grandes.

#### **3.4.2 Paquete de simulación en HYSYS**

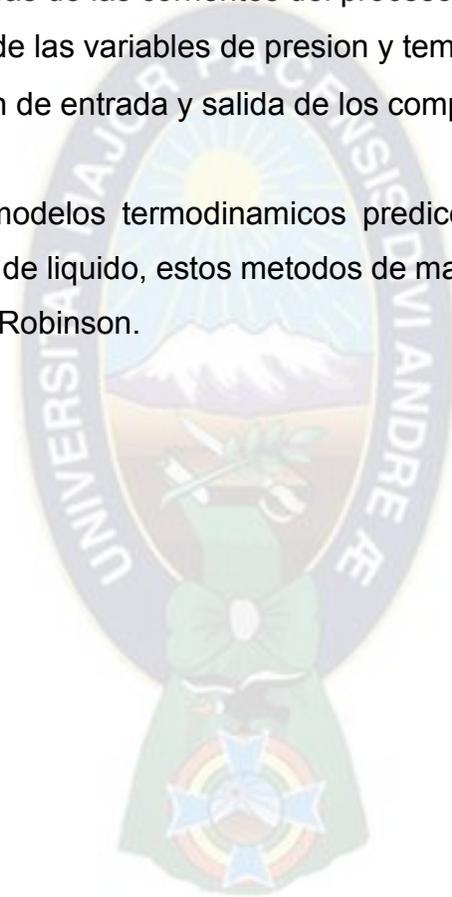
En la actualidad se utilizan modernas técnicas de computacionales para la resolución de las ecuaciones que modelan el comportamiento de la columna, las cuales se encuentran disponibles en diversos paquetes de simulación de procesos. Estos permiten lograr una alta de precisión en el diseño, la cual solo se ve limitada por la exactitud en el modelaje del comportamiento termodinámico del sistema.

En el paquete de Hysys en general pueden simularse columnas con múltiples fuentes de alimentaciones, múltiples etapas de enfriamiento, múltiples retiros laterales, condensadores parciales o totales.

La metodología utilizada para el diseño de la columna involucra las siguientes etapas:

- Características de las corrientes del proceso.
- Selección de las variables de presión y temperatura.
- Generación de entrada y salida de los componentes.

Los métodos o modelos termodinámicos predicen el comportamiento en el equilibrio de una mezcla de líquido, estos métodos de mayor aplicación son de Soave-Redlich-Kwong y Peng – Robinson.



## CAPITULO IV: “PROCEDIMIENTO, METODO Y MODELOS DE SOLUCION”

### 4.1 DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS PARA LA SIMULACION

Se procede a utilizar como materia prima aceites vegetales usados y también mezcla disponible necesaria. El producto ingresa a la simulación de software en el Hysys del proceso y pasa por un tratamiento de hidrocracking la ruptura de las moléculas y la obtención de aceites combustibles luego se lo lleva a una unidad de destilación para obtener jet fuel.

En la simulación se va a tener cuatro separadores que van a estar conectados a dos torres de columnas, que se va proceder a dosificar disulfuro de di metilo cómo agente sulfurante hasta alcanzar e incrementar la temperatura a 360 a 390 °C.

#### 4.1.1 Corriente de masa:

 ALIMENTACION Este símbolo indica el flujo de materia. Es necesario aportar información sobre su presión, temperatura, composición y caudal.

Los datos de alimentación se encuentran en la siguiente tabla:

**TABLA 8.**

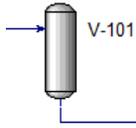
#### ***Flujo de entrada de alimentación***

ALIMENTACION		
Temperature	100.0	F
Pressure	314.7	psia
Molar Flow	4409	lbmole/hr

*Fuente: elaboración Propia.*

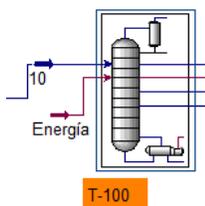
Para facilitar la manipulación de los flujos de entrada para el análisis de sensibilidad, todos los flujos de entrada se controlaron desde una entrada muestra, este flujo de entrada se muestra la a agua para pretratamiento, con 15 m<sup>3</sup>/h va entrar de aceite vegetal (del 0,5 al 5,0% en base a la masa de aceite).

#### 4.1.2 Uso de Separador



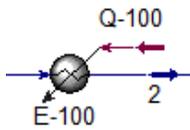
Esta es la figura de un separador, una vez obtenidos los productos en ese lapso de reacción, se procede a separar el gas que sale junto a la materia prima en un separador a una temperatura de 351,8°F para poder quitar todo el residuo de H<sub>2</sub>O y restos de otros gases que contaminan el jersey que se desea destilar antes de pasar a la columna de destilación.

#### 4.1.3 Uso de columna



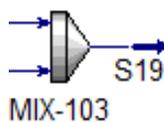
La columna de separación es la última fase de destilado para lograr obtener el jet fuel deseado eliminando toda contaminación en el producto. Se trabaja a altas temperaturas entre 400 a 450 °F.

#### 4.1.4 Intercambiadores de calor



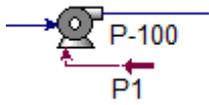
Para que el proceso sea eficiente se colocó 4 intercambiadores de calor en la simulación para tener más rendimiento en la obtención de Jet fuel ya que se utilizó temperaturas de un rango de 350 a 500 °F, y con presiones de rangos de 25 a 50 PSI.

#### 4.1.5 Mezclador



La operación de mezclado combinado dos o más corrientes de entrada para producir una única corriente de salida. Si se le proporciona las propiedades de todas las corrientes de entrada (presión, temperatura y composición), las propiedades de la corriente de salida son calculadas automáticamente.

#### 4.1.6 Bomba



Básicamente una bomba incrementa la presión del líquido entre la brida de succión y la descarga. En base a la presión requerida y las propiedades del fluido el software calcula la potencia hidráulica del equipo. Usualmente reporta la potencia mecánica que es el resultado de la potencia hidráulica dividido por la eficiencia de la bomba.

#### 4.2 SIMULADOR HYSYS

El concepto de estado estacionario es de uso muy generalizado en la ingeniería química para el diseño y evaluación de operaciones unitarias de forma individual y/o procesos que involucran múltiples operaciones unitarias, y su simulación constituye una de las principales herramientas para el análisis y diseño de procesos químicos. Por definición, cualquier proceso químico tiene un balance de materia y energía perfecto en el estado estacionario. Este principio se aplica también a operaciones unitarias individuales dentro de un proceso.

El principio de conservación de la materia se mantiene inalterable y cada unidad de masa que ingresa en las corrientes de alimentación sale del proceso en los productos; y en el caso de reacciones químicas, donde la materia experimenta una transformación, existe una igualdad entre el total de unidades de masa que ingresan y salen del proceso. Esta masa abandona el sistema en forma separada de los otros de productos de la reacción, y debe ser tomada en cuenta cuando se realice el balance de masa del proceso.

La técnica de agrupación en la alimentación del modelo Petroleum Refining de Aspen Hysys se fundamenta en una base de composiciones y un método para corregir éstas, sobre la base de cambios en propiedades medidas en masa. La alimentación se divide en varios pseudo componentes (que tienen entre 16 y 20 átomos de carbono) para cada grupo químico. Generalmente estas propiedades medidas en masa son la

curva de destilación y el contenido total de parafinas, naftenos y aromáticos (PNA). Adicionalmente, es posible trabajar con la composición detallada de la alimentación. En este caso, todos los constituyentes de la nafta deben agruparse, de acuerdo con los tipos de pseudo componentes que tiene el modelo para reformadores catalíticos (CatReform) de Aspen Hysys Petroleum Refining.

### **4.3 MODELACION Y SIMULACION DEL PROCESO DE HYDROCRACKING USANDO EL SOFTWARE HYSYS.**

#### **4.3.1 Datos de entrada**

La selección del paquete termodinámico de HYSYS el modelo elegido fue Peng Robinson.

El modelo de Peng Robinson es un modelo semi empírico que modifica el término de presión de atracción de la ecuación de Van Der Waals con el fin de determinar con mayor precisión el valor de la densidad de la fase líquida y el valor de la presión de vapor de sustancias puras y mezclas multicomponentes.

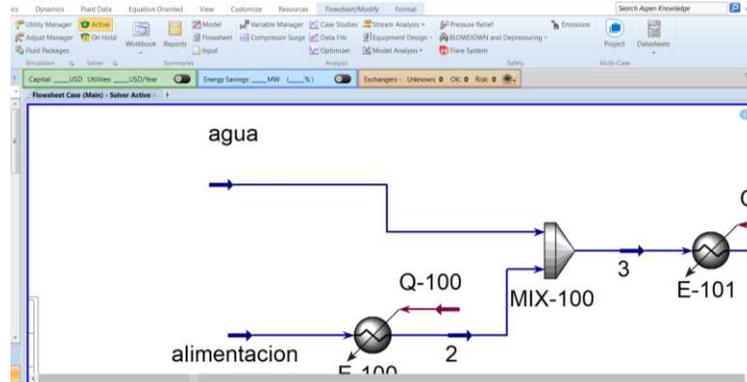
La ecuación de Peng Robinson es para cumplir una serie de objetivos:

1. Cerca del punto crítico, en particular para los cálculos del factor de compresibilidad de los gases y la densidad de los líquidos.
2. Los parámetros de la ecuación debían de poder ser expresados en función de las propiedades críticas y el factor acéntrico del compuesto.

Para la alimentación de aceite vegetal está entrando con una temperatura de 100,0°F. En la siguiente imagen se muestra los flujos de entrada:

## IMAGEN 10.

### Flujos de entrada del agua y la alimentación



Fuente: elaboración propia

La entrada de alimentación del triglicérido y del agua:

**TABLA 9.**

Flujos de entrada del agua y la alimentación presión y temperatura

Alimentación		
Temperature	100.0	F
Pressure	314.7	psia

Agua Desmineralizada		
Temperature	126,7	C
Pressure	21,28	bar

Fuente: Elaboración propia

Donde:

- Temperature: Temperatura (°C)
- Pressure: Presión (Psia)

En el proceso la masa de aceite ingresa con agua al intercambiador de calor con los siguientes valores de variables de proceso:

**TABLA 10.**

*Flujos de intercambiador de Calor E-100*

E-100		
Duty	7.911e+007	Btu/hr
Feed Temperature	100.0	F
Product Temperature	260.1	F

*Fuente: Elaboración propia.*

La parte del separador es:

**TABLA 11.**

*Flujos de separador V-101*

V-101		
Separator Type	Separator	
Vessel Temperature	450.0	F
Vessel Pressure	274.7	psia

*Fuente: Elaboración propia.*

Para el mezclador:

**TABLA 12.**

*Flujos de un mezclador MIX - 102*

MIX-102		
Product Molar Flow	97.14	lbmole/hr
Product Mass Flow	2.972e+004	lb/hr
Product Volume Flow	2279	barrel/day
Product Temperature	518.3	F
Product Pressure	32.61	psia

*Fuente: Elaboración propia.*

Para el separador de recortes livianos:

**TABLA 13.**

*Flujos de vapor Seco*

Vapor Seco		
Temperature	518.3	F
Pressure	32.61	psia
Molar Flow	3.255e-002	lbmole/hr
Std Ideal Liq Vol Flow	9.294e-002	barrel/day

*Fuente: Elaboración propia.*

**TABLA 14.**

*Flujos de Separador V - 103*

V-103		
Separator Type	Separator	
Vessel Temperature	519.4	F
Vessel Pressure	32.61	psia
Liquid Molar Flow	82.66	lbmole/hr
Duty	0.0000	Btu/hr

*Fuente: Elaboración propia.*

Luego se procede a presentar el resultado de balance de materia de los productos obtenidos con los siguientes valores de las variables que se necesitan:

Para la inyección de gas seco de Hidrógeno:

**TABLA 15.**

*Flujos de Gas seco*

Gas Seco		
Temperature	68,35	C
Pressure	1,434	bar
Std Ideal Liq Vol Flow	2,774e-005	m3/h

*Fuente: Elaboración propia.*

Para la Nafta:

**TABLA 16.**

*Flujos de salida de Nafta*

Nafta		
Temperature	155.0	F
Pressure	20.80	psia
Molar Flow	2130	lbmole/hr

*Fuente: Elaboración propia.*

Para el Gas oil:

**TABLA 17.**

*Flujos de salida de Nafta*

Gas-Oil		
Temperature	518.3	F
Pressure	32.61	psia
Molar Flow	97.14	lbmole/hr

*Fuente: Elaboración propia.*

Para la primera y segunda salida del flujo de Jet Fue del separador y la torre de destilacion:

**TABLA 18.**

*Flujos de salida de Nafta*

JET FUL		
Temperature	365.6	F
Pressure	28.53	psia
Molar Flow	667.7	lbmole/hr
Std Ideal Liq Vol Flow	1.004e+004	barrel/day

JET FUL 2		
Temperature	519.4	F
Pressure	32.61	psia
Molar Flow	82.66	lbmole/hr
Std Ideal Liq Vol Flow	1941	barrel/day

*Fuente: Elaboración propia.*

En la primera parte se muestra que el jet ful de la torre sale 10,040 BPD, en la segunda parte de saca 1,941 BPD.

### 4.3.2 Descripción del proceso

Este proceso se caracteriza principalmente por la presencia de un catalizador, el cual es un factor preponderante en el funcionamiento de la unidad de cracking catalítico.

La circulación del RX al RG se establece por el peso de columna de catalizador más la presión propia del RX.

La circulación incide sobre las siguientes variables:

- Relación catalizador / carga.
- Tiempo de residencia del catalizador en el RG.
- Velocidad espacial.
- Selectividad de las reacciones.
- Descripción del funcionamiento.

El catalizador con los productos de la reacción continúa por el riser (flujo de subida) y descargan en el recinto del RX, donde caen las partículas de catalizador por pérdida de velocidad y diferencia de densidad.

El objetivo principal del tratamiento es acondicionar la carga a las unidades de reforming catalítico (remformado catalítico) e isomerización. La remoción de metales, junto con la eliminación de azufre, oxígeno y nitrógeno es necesaria debido a que éstos son venenos para los catalizadores.

Las principales reacciones que se llevan a cabo en las unidades de hidrotratamiento son:

- Saturación de Olefinas.

- Remoción de Azufre.
- Remoción de Nitrógeno

La remoción de metales es completa cuando la temperatura de reacción supera los 515 °F (270,8 °C).

El gas generado en el tanque de descomposición se lleva a una torre de catalizador para realizar la descomposición de su nivel molecular e hidrogenación. El sistema está diseñado para que dicho proceso se realice a gran velocidad ya que el tratamiento se completa rápidamente. Entonces pasa a través de un segundo molde catalizador y se sintetiza en otros compuestos, dependiendo de la frecuencia y la información relativa al movimiento ondulatorio que existe en el molde catalizador. El producto sintetizado se enfría en un condensador y se almacena en el tanque de almacenamiento de producto final.

Las unidades de cracking catalítico fluido son las productoras de aceite vegetal por excelencia, en calidad y cantidad. Producen menor cantidad de gas residual que el cracking térmico y alta calidad de propano y propileno, butilenos, isobutanos y butanos. Estas corrientes son la materia prima para los procesos petroquímicos.

#### **4.3.3 Equipos propuestos**

Los equipos de reacción de las unidades de cracking tienen tres partes fundamentales:

##### **4.3.3.1 Regenerador (RG)**

Es la parte de la unidad donde se quema el carbón depositado sobre el catalizador, posee unos sistemas de distribución del aire necesario para la combustión provisto por un compresor de aire. Dicho compresor es la máquina más importante de la unidad ya que si no hay aire para regeneración debe detenerse la unidad. Posee ciclones que separan los gases de la combustión del catalizador arrastrado que están revestidos por material refractario que impiden la erosión y protege a las paredes metálicas de la alta temperatura. La temperatura de operación de 405 °F - 550 °F.

#### **4.3.3.2 Stripper (ST)**

La función del stripper es separar los componentes más ligeros del flujo de salida, lo que a menudo se hace mediante la aplicación de calor y/o reducción de presión para promover la vaporización de estos componentes. Estos componentes pueden ser gases o líquidos que tienen un punto de ebullición más bajo que los componentes más pesados presentes en el flujo.

#### **4.3.4 Ventajas de la propuesta de sistema**

En este proceso, se pueden enunciar ciertas ventajas tales como:

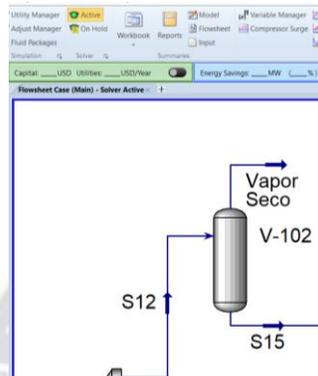
- La regeneración del aceite se completa rápidamente y se obtiene una alta producción.
- Sistema de refinado de aceite a presión atmosférica y baja temperatura: proceso seguro y rentable.
- La planta es simple y compacta y los costes de construcción y administración son más bajos que el refinamiento de destilación fraccional de aceite vegetal convencional.
- Producto ultra-bajo en azufre y reducción considerable de emisiones.
- Permite refinar aceite residual (mineral y vegetal y residuos de plástico a un aceite-carburante de alta calidad).

Además, es un proceso de gran flexibilidad, ya sea con relación a las diferentes alimentaciones que queremos procesar, o a los productos que queremos obtener.

#### 4.3.5 Cálculo de volumen para un separador.

##### IMAGEN 11.

Un separador en la simulación Hysys



Fuente: Elaboración propia.

La función objetivo es entonces:

$$\dot{m} = -4,0229L^4 + 116,85L^3 - 1150,5L^2 + 5204L + 261,16$$

Sujeta a:

$$V_{ol} = F D^2 L$$

$$V_{Gmax} = \frac{4q_a}{D_{min}^2 * \pi F_g}$$

$$K_{SH} = K_{SV} \left( \frac{L_e}{h_g} \right)$$

$$K_S = a + bP + cP^2 + dP^3$$

Para la derivada  $\frac{\partial L_p}{\partial L}$ , se tiene:

$$\frac{\partial L_p}{\partial L} = -4 * 4,0229L^3 + 3 * 116,85L^2 - 2 * 1150,5L + 5204 + \lambda_1(F D^2) + \lambda_3 \left( \left( \frac{K_{SV}}{h_g} \right) \right)$$

Para la derivada  $\frac{\partial L_p}{\partial P}$ , se tiene:

$$\frac{\partial L_p}{\partial P} = \lambda_4(b + 2cP + 3dP^2)$$

Para la derivada  $\frac{\partial L_p}{\partial \lambda_1}$ , se tiene:

$$\frac{\partial L_p}{\partial \lambda_1} = (F D^2 L - V)$$

$$V = F D^2 L$$

Para la derivada  $\frac{\partial L_p}{\partial \lambda_2}$ , se tiene:

$$\frac{\partial L_p}{\partial \lambda_2} = \left( \frac{4q_a}{D_{min}^2 * \pi F_g} - V_{Gmax} \right)$$

$$V_{Gmax} = \frac{4q_a}{D_{min}^2 * \pi F_g}$$

Para la derivada  $\frac{\partial L_p}{\partial \lambda_3}$ , se tiene:

$$\frac{\partial L_p}{\partial \lambda_3} = (-K_{SH} + K_{SV} \left( \frac{L_e}{h_g} \right))$$

$$K_{SH} = K_{SV} \left( \frac{L_e}{h_g} \right)$$

Para la derivada  $\frac{\partial L_p}{\partial \lambda_4}$ , se tiene:

$$\frac{\partial L_p}{\partial \lambda_4} = (-K_S + a + bP + cP^2 + dP^3)$$

$$K_S = a + bP + cP^2 + dP^3$$

Resolviendo e iterando se tiene:

$$\left( \frac{1}{2} \frac{hD}{\ln^2 \left( \frac{T - T_{out}}{T_e - T_{out}} \right)} \times \frac{1}{T_e - T_{out}} \right) = 0$$

$$\ln^{-2} \left( \frac{T - T_{out}}{T_e - T_{out}} \right) = 0$$

$$\left( \frac{T - T_{out}}{T_e - T_{out}} \right) = e^0 = 1$$

$$T - T_{out} = T_e - T_{out}$$

Entonces la temperatura óptima del separador no debe exceder a la temperatura de entrada:

$$T_{opt} = T_e$$

Por otra parte:

$$-4 * 4,0229L^3 + 3 * 116,85L^2 - 2 * 1150,5L + 5204 + \lambda_1(F D^2) = 0$$

En la ecuación cinética

$$k = -\frac{1}{2} \frac{hD}{\ln \frac{(T_e - T_{out})}{T_e}}$$

$$D = -2k \ln \frac{T_e - T_{out}}{T_e}$$

Pero no existen diámetros negativos, así que aplicando leyes de los logaritmos:

$$D_{optimo} = \frac{1}{h} \ln \left[ \frac{T_e}{T_e - T_{out}} \right]^{2k}$$

Entonces  $\lambda_2$  será igual a:

$$\lambda_2 = - \frac{\lambda_1 2FD \times \frac{1}{h} \ln \left[ \frac{T_e}{T_e - T_{out}} \right]^{2k} \times \ln \frac{(T_2 - T_{out})}{(T_2)}}{h}$$

$$\lambda_2 = \left( \lambda_1 2F \times \ln \left[ \frac{T_e}{T_e - T_{out}} \right]^{2k} \times \frac{\ln((T_2 - T_{out}))}{(T_2)} \right)$$

Cálculo de la longitud óptima de Separador

$$V = F \left( \frac{1}{h} \ln \left[ \frac{T_e}{T_e - T_{out}} \right]^{2k} \right)^2 L$$

$$L = V / \left( F \left( \frac{1}{h} \ln \left[ \frac{T_e}{T_e - T_{out}} \right]^{2k} \right)^2 \right)$$

Sustituyendo de la última gráfica la longitud de 3 m y el F de 8000 Kg/hr. También las temperaturas optimizadas anteriores son de 250 a 270 °C.

$$V = F \left( \frac{1}{h} \ln \left[ \frac{T_e}{T_e - T_{out}} \right]^{2k} \right)^2 L$$

$$V = \frac{8000}{1000} \left( \ln \left[ \frac{270}{270 - 250} \right]^{2 \cdot 0.33} \right)^2 3$$

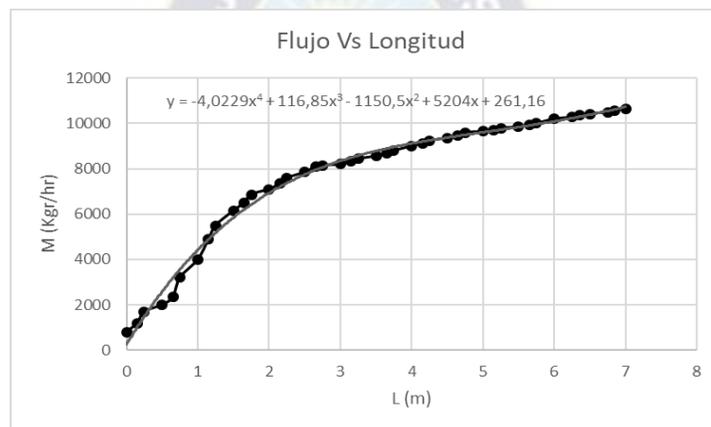
$$V_{jetfuel} = 70,81 \text{ Kg/h}$$

Este resultado muestra la capacidad para un separador óptimo de acuerdo con el diámetro y la longitud depende de la temperatura de entrada y salida.

Graficando la relación de altura del separador y flujo másico obtenido:

### **GRAFICA 5.**

*Relación de altura del separador y flujo másico obtenido*



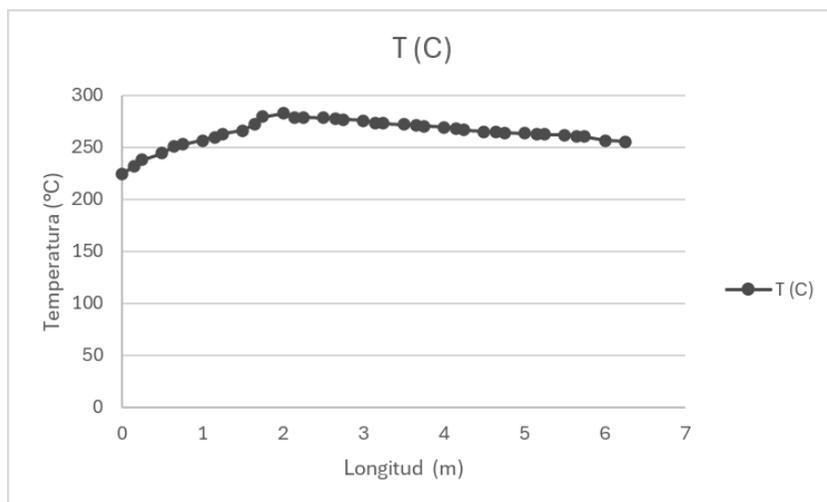
**Fuente:** *Elaboración propia en base a simulación*

En la gráfica 5. la recolección de datos obtenidos con la iteración de HYSYS, después se realiza una regresión polinómica para obtener la función matemática que representará la función de optimización para la relación de altura del separador y flujo másico obtenido. El eje x de las ordenadas representa la altura del separador, y el eje Y de las abscisas representa el flujo másico de jet fuel orgánico obtenido.

Graficando la relación de Altura del separador y Temperatura:

## GRAFICA 6.

### Relación de Altura del separador y Temperatura



**Fuente:** *Elaboración propia en base a simulación*

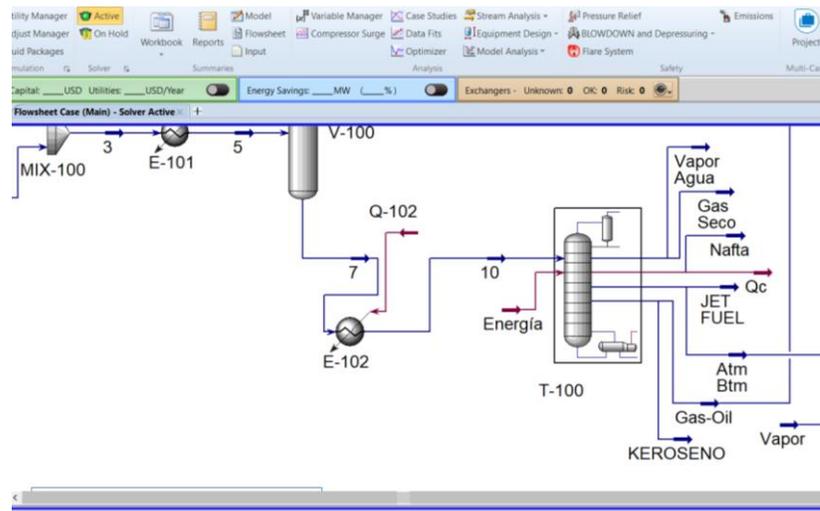
En la anterior grafica 6, se grafica la recolección de datos obtenidos con la iteración de HYSYS, después se realiza una regresión polinómica para obtener la función matemática que representará la función de optimización para la relación de la altura del separador y la temperatura del mismo. El eje x de las ordenadas representa la longitud, y el eje Y de las abscisas representa la temperatura del Separador

#### 4.4 CALCULO DE LA COLUMNA FUJO DE ENTRADA Y SALIDA.

La columna de separación es la última fase de destilado para lograr obtener el jet fuel deseado eliminando toda contaminación en el producto. Se trabaja a altas temperaturas entre 400 a 450 °F. Como se muestra en la imagen (7):

## IMAGEN 12.

### Una torre de destilación en Hysys



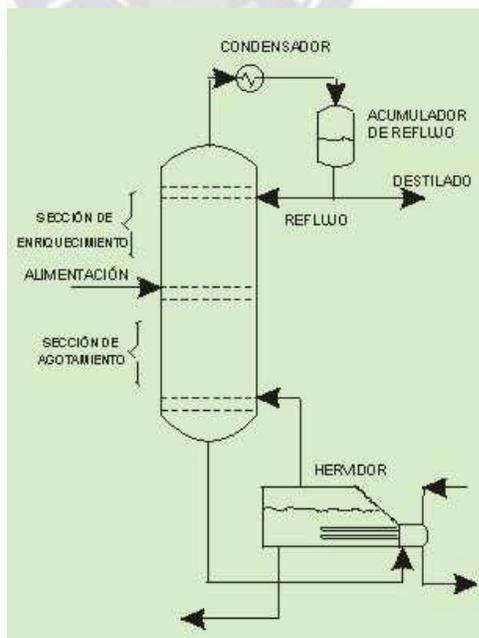
*Fuente: elaboración propia*

En la imagen 12. se muestra la destilación de vapor seco, nafta, Jet Ful, Keroseno y entre otros compuestos.

#### 4.4.1 FLUJO DE ENTRADA Y DE SALIDA DE LA TORRE DE DESTILACION

## IMAGEN 13.

### Esquema de una torre de destilación



*Fuente: Según revista de química industrial*

El trabajo de investigación se sacó datos bibliográficos de las normas ASTM.

En la tabla (19), se muestra las condiciones de operación en las que fue a cabo la columna de destilación, el hidrocrqueo se utiliza en la torre para descomponer la compleja cadena larga de triglicéridos en estructuras más cortas para la producción de biocombustibles.

El líquido que sale del parte inferior conectado por un hervidor va salir el keroseno y el Jet Fuel.

A continuación, se va hacer Balance global de los flujos

$$E = S \dots \dots \dots (1)$$

$$F_{10} = D + R + W + K \dots \dots (2)$$

$F_{10}$  = Flujo de entrada de entrada (10) m<sup>3</sup>/h

$D$  =Flujo de salida de Nafta m<sup>3</sup>/h

$R$  =Flujo de salida de Jet fuel m<sup>3</sup>/h

$D$  =Flujo de salida de Keroseno m<sup>3</sup>/h

$K$  =Flujo de salida del Vapor agua, Gas seco, desechos (m<sup>3</sup>/h)

Reemplazando datos obtenidos de la simulación en hysys

$$F_{10} = D + R + W + K$$

$$\frac{525m^3}{h} = 139,8 + 66,5 + 48,58m^3/h + K$$

$$K = 270,82 \frac{m^3}{h} \dots \dots (3)$$

De la ecuación 3 se muestra la concentración m<sup>3</sup>/ h de flujo de salida del vapor seco, gas seco, desechos. Por otra parte, lo que nos interesa es la los flujos de salida de keroseno y del jet ful.

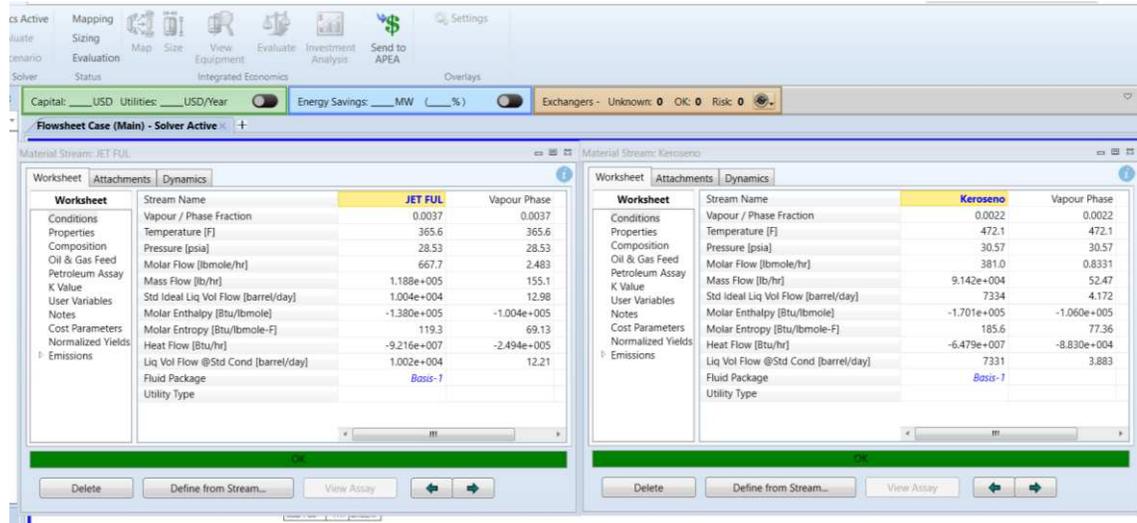
$R$  =Flujo de salida de Jet fuel m<sup>3</sup>/h=139,8 m<sup>3</sup>/h

$D$  =Flujo de salida de Keroseno m<sup>3</sup>/h=48,5 m<sup>3</sup>/h

En la imagen (9) muestra las propiedades finales de hysys del keroseno y del jet ful de la columna:

## IMAGEN 14.

### Una torre de destilación en Hysys



Fuente: Elaboración propia

En la imagen 14. se muestra calculo en presiones y temperaturas, con flujos de salida de keroseno, jet fuel, de la simulación del software hysys en la tabla (19), se muestra detalladamente los flujos de del keroseno y Jet fuel:

**Tabla 19**

### Flujos de salida del Keroseno y Jet Fuel

	JET FUL		KEROSENO
<b>Presion (Psi)</b>	28,53	<b>Presion (Psi)</b>	30,57
<b>temperatura (°F)</b>	365,6	<b>temperatura (°F)</b>	472,1
<b>volumen de flujo (Barril/dia)</b>	10,040	<b>volumen de flujo (Barril/dia)</b>	7,334
<b>Flujo molar (kg/h)</b>	53,860	<b>Flujo molar (kg/h)</b>	41,470

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4.2 Funciones multivariables obtenidas

Para encontrar puntos máximos y mínimos en funciones matemáticas que involucren temperatura (T), presión (P), y flujo másico (m), se pueden utilizar métodos de cálculo diferencial. A continuación se muestra la ecuacion multivariable:

$$f(T, P, m) = 2T^2 - P^3 + 4PT + 4m^2 + 3P + 8T$$

Se va resolver por metodo hessiano

$$f(T) = 4T + 4m + 8 \dots (1)$$

$$f(P) = -3P^2 + 3 \dots (2)$$

$$f(m) = 4P + 8m \dots (3)$$

Operando y resolviendo cada variable

$$f(P) = 4P + 4m + 8 = 0 \Rightarrow P = -4$$

$$f(T) = -3T^2 + 3 = 0 \Rightarrow T = \pm 1$$

$$f(m) = 4P + 8m \Rightarrow m = 2$$

Se tiene dos puntos que son:

$$P_1 = (x, y, z) = (P, T, m) = (-4, 1, 2)$$

$$P_2 = (x, y, z) = (P, T, m) = (-4, -1, 2)$$

Se calcula la matriz hessiana utilizando las derivadas parciales segundas:

$$H = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 4 \\ 0 & 6P & 0 \\ 4 & 0 & 8 \end{bmatrix}$$

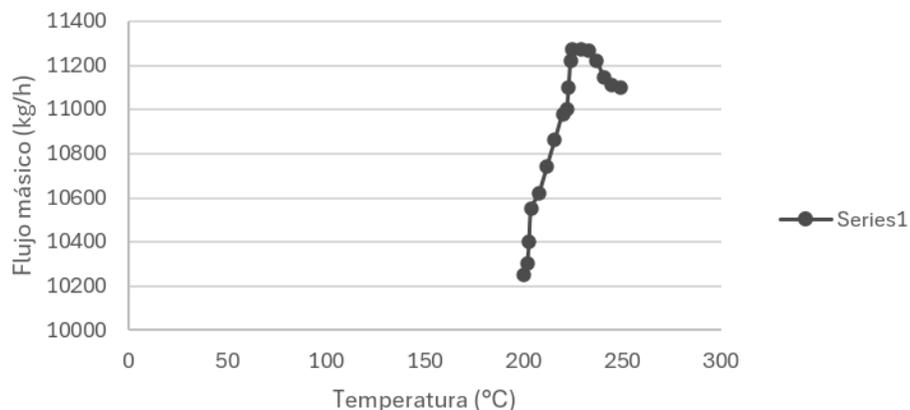
$$\Delta 1 = 4; \Delta 2 = -24; \Delta 3 = -96$$

E toma la respuesta positiva de 4 esto quiere decir que el punto maximo P (presion) va hacer 4 bar y el punto minimo va hace de 1 bar.

Las funciones obtenidas son polinomios complejos que agrupan los valores y modelan los procesos de obtención de jet fuel. Mientras mayor sea el grado, más exacto será el valor optimizado del proceso. Graficando la relación de Temperatura del separador y flujo másico de jet fuel orgánico obtenido:

### GRAFICA 7.

*Relación de Temperatura de la Torre y flujo másico de jet fuel orgánico obtenido*



**Fuente:** *Elaboración propia en base a simulación*

En el gráfico (7), la recolección de datos obtenidos con la iteración de HYSYS, después se realiza una regresión polinómica para obtener la función matemática que representará la función de optimización para la relación de temperatura de la torre, y el eje Y de las abscisas representa el flujo másico de jet fuel orgánico.

De la anterior gráfica (7), se obtiene la siguiente función polinómica:

**TABLA 20**

*Características del polinomio A*

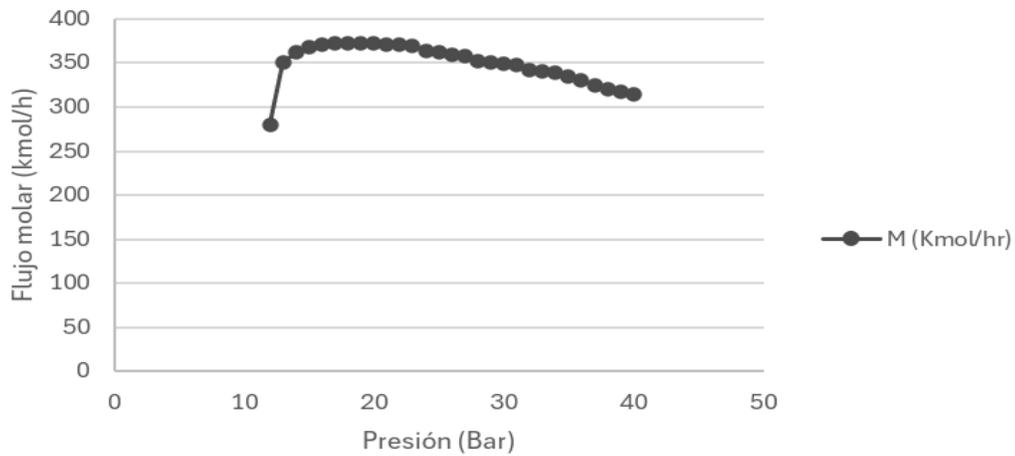
Función polinómica:	
$\dot{m} = 0,0002T^4 - 0,2193T^3 + 73,351T^2 - 10754T + 592496$	
Grado del polinomio:	Cuarto Grado
Variable dependiente:	Flujo Másico
Variable independiente:	Temperatura
Error de aproximación:	0,05
Correlación de los datos:	0,85

*Fuente: Elaboración propia en base a simulación*

En la anterior Tabla (20). Se describen las características del polinomio obtenido de la relación de la Grafica (7) la relación de Presión y flujo másico de jet fuel orgánico obtenido:

**GRAFICA 8.**

*Relación de Presión interna de la torre y flujo másico de jet fuel orgánico obtenido*



*Fuente: Elaboración propia en base a simulación*

En la anterior Figura 5.2, se grafica la recolección de datos obtenidos con la iteración de HYSYS, después se realiza una regresión polinómica para obtener la función matemática que representará la función de optimización para la relación de presión interna. De la anterior gráfica se obtiene la siguiente función polinómica:

**TABLA 21**

*Características del polinomio B*

Función polinómica:	
$\dot{m} = -2 \times 10^{-5}P^6 + 0,003P^5 - 0,23P^4 + 8,26P^3 - 161,11P^2 + 1637,3P - 6393$	
Grado del polinomio:	Sexto Grado
Variable dependiente:	Flujo Másico
Variable independiente:	Presión
Error de aproximación:	0,032
Correlación de los datos:	0,97

*Fuente: Elaboración propia en base a simulación*

#### 4.4.3 Función objetivo

Para la función objetivo del flujo másico de jet fuel orgánico en función de la temperatura:

$$\dot{m} = 0,0002T^4 - 0,2193T^3 + 73,351T^2 - 10754T + 592496$$

$$\frac{d\dot{m}}{dT} = 0,0008T^3 - 0,6429T^2 + 146,702T - 10754$$

$$\frac{d\dot{m}}{dT} = 0 \rightarrow 0,0008T^3 - 0,6429T^2 + 146,702T - 10754 = 0$$

$$T_1 = 224,89 \text{ [}^\circ\text{C]} ; T_2 = 235,97 \text{ [}^\circ\text{C]} ; T_3 = 254,56 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\frac{d^2\dot{m}}{dT^2} = 0,00024T^2 - 1,286T + 146,702$$

$$\left. \frac{d^2\dot{m}}{dT^2} \right|_{T=224,89 \text{ [}^\circ\text{C]}} = -130,368 ; \text{Punto minimo}$$

$$\left. \frac{d^2\dot{m}}{dT^2} \right|_{T=235,97 \text{ [}^\circ\text{C]}} = -143,39 ; \text{Punto optimo}$$

$$\left. \frac{d^2\dot{m}}{dT^2} \right|_{T=254,56 \text{ [}^\circ\text{C]}} = -165,10 ; \text{Punto maximo}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{minimo}} &= 0,0002 * (224,89)^4 - 0,2193 * (224,89)^3 \\ &\quad + 73,351 * (224,89)^2 - 10754 * (224,89) + 592496 \end{aligned}$$

$$\dot{m}_{\text{minimo}} = 50,1978 \text{ [Kgr/hr]}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{optimo}} &= 0,0002 * (235,97)^4 - 0,2193 * (235,97)^3 \\ &\quad + 73,351 * (235,97)^2 - 10754 * (235,97) + 592496 \end{aligned}$$

$$\dot{m}_{optimo} = 51,189 [Kgr/hr]$$

$$\dot{m}_{maximo} = 0.0002 * (254.56)^4 - 0.2193 * (254.56)^3 + 73.351 * (254.56)^2 - 10754 * (254.56) + 592496$$

$$\dot{m}_{maximo} = 56,515 [Kgr/hr]$$

Resultados de las ecuaciones se presentan en la siguiente tabla:

**TABLA 22**

*Resultados del flujo másico orgánico en función de la temperatura*

Detalle	Resultado
$\left. \frac{d^2 \dot{m}}{dT^2} \right _{T=224,89 [^{\circ}C]}$	-130,3684 <i>como Punto maximo</i>
$\left. \frac{d^2 \dot{m}}{dT^2} \right _{T=235,97 [^{\circ}C]}$	-143.3917 <i>como Punto optimo</i>
$\left. \frac{d^2 \dot{m}}{dT^2} \right _{T=254,56 [^{\circ}C]}$	-165.109 <i>como Punto maximo</i>
$\dot{m}_{minimo}$	50,19 [Kgr/hr]
$\dot{m}_{optimo}$	51,189 [Kgr/hr]
$\dot{m}_{maximo}$	56,515 [Kgr/hr]

*Fuente: Elaboración propia*

Para la función objetivo de la temperatura de la columna de separación de jet fuel orgánico en función de la longitud:

$$\frac{d^2 T}{dL^2} = -0,974L^3 + 8,922L^2 - 17,6868L - 8,9628$$

$$\left. \frac{d^2 T}{dL^2} \right|_{L=5,3 [m]} = 2.909942; \text{Punto maximo}$$

$$\left. \frac{d^2T}{dL^2} \right|_{L=5,76 [m]} = -0.96251942$$

$$\left. \frac{d^2T}{dL^2} \right|_{L=2,67 [m]} = -11.121785 ; \text{Punto optimo}$$

$$\left. \frac{d^2T}{dL^2} \right|_{L=2,45 [m]} = -13.0649208 ; \text{Punto minimo}$$

$$T_{\text{minimo}} = -0,0487(2,45)^5 + 0,7436(2,45)^4 - 2,9478(2,45)^3 - 4,4814(2,45)^2 + 40,95(2,45) + 225,78$$

$$T_{\text{minimo}} = 258,24 [^{\circ}\text{C}]$$

$$T_{\text{optimo}} = -0,0487(2,67)^5 + 0,7436(2,67)^4 - 2,9478(2,67)^3 - 4,4814(2,67)^2 + 40,95(2,67) + 225,78$$

$$T_{\text{optimo}} = 261,14 [^{\circ}\text{C}]$$

$$T_{\text{maximo}} = -0,0487(5,3)^5 + 0,7436(5,3)^4 - 2,9478(5,3)^3 - 4,4814(5,3)^2 + 40,95(5,3) + 225,78$$

$$T_{\text{maximo}} = 270.06 [^{\circ}\text{C}]$$

Los resultados para la función objetivo de la temperatura del reactor de jet fuel orgánico en función de la longitud se muestran en la siguiente tabla:

**TABLA 23**

*Resultados de la temperatura de la torre en función de la longitud.*

Detalle	Resultado
$\left. \frac{d^2T}{dL^2} \right _{L=5,3 [m]}$	2.909942 ; <i>Punto maximo</i>
$\left. \frac{d^2T}{dL^2} \right _{L=5,76 [m]}$	-0.96251942

$\left. \frac{d^2T}{dL^2} \right _{L=2,67 [m]}$	-11.121785 ; <i>Punto optimo</i>
$\left. \frac{d^2T}{dL^2} \right _{L=2,45 [m]}$	-13.0649208 ; <i>Punto minimo</i>
$T_{minimo}$	258.24 [°C]
$T_{optimo}$	261.14 [°C]
$T_{maximo}$	270.06[°C]

Fuente: Elaboración propia

Resultados de optimización de variables de operación del proceso:

**TABLA 24**

*Resultados finales de la Optimización*

Variable del proceso	Dato de Simulación (Max y min)	Datos Calculados optimizados
Temperatura ( °C)	185,4 a 270,8	261,14
Presión (bar)	1,9 a 2,249	2,437
Flujo volumétrico (Barril/día)	10,040	8,965
Flujo masico (kg/h)	53,86	51,189

*Fuente: Elaboración propia en base a simulación*

En la tabla 24. se muestra las comparaciones cálculos del software Hysys con datos máximos y mínimos; y cálculos matemáticos calculados para temperatura, presión, flujo volumétrico y flujo masico del producto.

Las dimensiones la torre se sacó de acuerdo a la simulación:

**TABLA 25**

*Dimensiones de la torre de destilación*

<b>Volumen (m3)</b>	<b>56.63</b>
<b>Altura (m)</b>	<b>5.454</b>
<b>Diametro (m)</b>	<b>3.63</b>
<b>Numero de platos</b>	<b>10</b>

*Fuente: Elaboración propia en base a simulación*

#### 4.4.4 Cálculos del Jet fuel y del keroseno por m<sup>3</sup> por mes

Los volúmenes obtenidos de jet fuel y kerosene de la planta refinera Gualberto Villarroel es:

$$\text{Jet Fuel} = 6,775.4 \text{ m}^3/\text{mes}$$

$$\text{Kerosene} = 1,248.7 \text{ m}^3/\text{mes}$$

La planta en total que produce para el consumo de los aviones:

$$\text{Total de Combustible de avion} = 8.024,1 \text{ m}^3/\text{mes}$$

La capacidad que produce la Refinería Gualberto Villarroel es de 39.750 BPD pero la Refinería actual produce 35.000 BPD, se calculara m<sup>3</sup>/mes:

$$35,000 \frac{\text{Bbl}}{\text{dia}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{6,28 \text{ Bbl}} \times \frac{30 \text{ dias}}{1 \text{ mes}} = 167,197.45 \text{ m}^3/\text{mes}$$

$$182 \text{ Mml} \times \frac{1 \text{ m}^3}{\text{dia}} = 182.000 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} = 15,167 \text{ m}^3/\text{mes}$$

Los flujos de entrada de aceite que se tiene en la simulación de Hysys del keroseno y del Jet fuel

$$\text{Jet Fuel} = 9,86 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Kerosene} = 8,58 \text{ m}^3/\text{h}$$

Sumando los datos se tiene 18,44 m<sup>3</sup>/h, con el valor obtenido se calcula m<sup>3</sup>/mes

$$18,44 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ dia}} \times \frac{30 \text{ dias}}{1 \text{ mes}} = 13,277.45 \text{ m}^3/\text{mes}$$

Este valor de 13,277.45 m<sup>3</sup>/mes cubre la demanda interna para Bolivia.

## CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA

### 5.1 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA

En este tipo de análisis se utiliza la metodología cualitativa, para identificar las propiedades del proyecto que se propone analizando las ventajas, desventajas o características positivas frente a otras negativas. Existen muchos métodos de análisis de factibilidad técnica pero solo se aplicarán 2 en este proyecto que es el análisis FODA y el análisis de ventajas y desventajas.

#### 5.1.1 Análisis FODA

A continuación, se presenta el siguiente análisis FODA el cual consiste en caracterizar las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del proyecto Bolivia.

**TABLA 26**  
*Aspectos de Fortaleza*

<b>Aspecto</b>	<b>Descripción</b>
<b>Recursos naturales</b>	Bolivia puede tener acceso a recursos naturales abundantes, como aceites reciclados, para la producción de biodiesel.
<b>Enfoque en sostenibilidad</b>	Un enfoque creciente en la sostenibilidad y la gestión de residuos podría respaldar la aceptación del biodiesel producido a partir de aceite reciclado.
<b>Marco regulatorio favorable</b>	Posible existencia de políticas gubernamentales favorables que promueven el uso de biocombustibles y la gestión sostenible de los recursos.

*Fuente: Elaboración propia*

**TABLA 27**

*Aspectos de oportunidades*

<b>Aspecto</b>	<b>Descripción</b>
<b>Creciente demanda de energía renovable</b>	La creciente demanda global de energía renovable podría crear oportunidades para el biodiesel en Bolivia.
<b>Colaboración con industria del reciclaje</b>	Establecer colaboraciones con la industria del reciclaje podría asegurar un suministro constante de aceite reciclado.
<b>Desarrollo de tecnologías sostenibles</b>	Oportunidad de adoptar tecnologías más eficientes y sostenibles para la producción de biodiesel, alineándose con las metas ambientales.

*Fuente: Elaboración propia*

**TABLA 28**

*Aspectos de debilidades*

<b>Aspecto</b>	<b>Descripción</b>
<b>Infraestructura limitada</b>	La infraestructura limitada podría afectar la implementación eficiente de plantas de producción de biodiesel.
<b>Posibles variaciones en la calidad del aceite reciclado</b>	La variabilidad en la calidad del aceite reciclado podría afectar la consistencia en la producción de biodiesel.
<b>Dependencia de incentivos gubernamentales</b>	Dependencia de incentivos gubernamentales que podrían cambiar con el tiempo y afectar la rentabilidad del proyecto.

*Fuente: Elaboración propia*

**TABLA 29**

*Aspecto de Amenazas*

<b>Aspecto</b>	<b>Descripción</b>
<b>Competencia con combustibles fósiles</b>	La competencia con combustibles fósiles a precios bajos podría afectar la adopción del biodiesel.
<b>Resistencia del mercado</b>	Posible resistencia del mercado a cambiar de combustibles tradicionales a biocombustibles, especialmente si hay falta de conciencia.
<b>Factores económicos y políticos</b>	Factores económicos y políticos, como cambios en el gobierno o crisis económicas, podrían afectar la estabilidad del mercado.

*Fuente: Elaboración propia*

## **5.2 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA**

Sabiendo que el proyecto cualitativamente tiene muchos aspectos positivos como para desarrollarlo y se constata que es una buena idea aplicarla en el país, necesitamos saber si tendrá un buen rendimiento económico, es decir; Los costos serán relativamente bajos y los ingresos o ganancias relativamente altas.

### **5.2.1 Evaluación de costos**

Para el análisis teórico económico de la producción de Jet Fuel a partir de residuos aceite reciclado, se plantea un escenario para la producción de 1000 L de este biocombustible.

Por otro lado, no se registra costos de la materia prima, es decir, residuos de pulpa, pepitas y tallo. Pero podemos realizar un cálculo aproximado del coste.

Primeramente, según INE (2022) el costo de 10000 litros aceite reciclado es de \$us. 2000.- aproximadamente.

También, de 10000 litros al de aceite de cocina que le cuesta de 0.07 \$us, se hace un luego:

$$\text{Precio residuos: } 1000 * 0.07$$

$$\text{Precio residuos: } \$us.700$$

Para el cálculo del coste de materia prima, se consideran costos de mercado de mayoreo para las materias primas fundamentales del proceso:

**TABLA 30**

*Costo de Materia Prima*

<b>Materia prima</b>	<b>Escenario (Litros/día)</b>	<b>Precio unitario \$ (6.96\$)</b>
<b>Residuo de aceite de cocina</b>	100000	0.07
<b>Etanol</b>	40000	10.06

*Fuente: Elaboración propia.*

En un hipotético caso de la implementación de una planta para la producción de Jet Fuel, se consideran los siguientes costos:

**TABLA 31**

*Costos generales*

<b>Costo variable unitario (\$us/kg)</b>	<b>21,75</b>
<b>Ingresos productos (\$us/kg)</b>	0,05
<b>Costos fijos de operación \$us</b>	652.377,62
<b>Inversión \$us</b>	6.390.585,00
<b>Vida útil de la planta (años)</b>	25
<b>Días laborales</b>	350
<b>Tasa de descuento de una planta química</b>	8,84%
<b>Estimación de ingresos</b>	1.097.250,00 \$us

*Fuente: Elaboración propia.*

En torno a los equipos, se muestran el costo unitario y dimensiones de los equipos utilizados para el proyecto:

**TABLA 32***Cálculo de costos Fijos de las maquinas*

	costo [\$us]	Tipo
SEPARADORES	130.500	equipo
MIXER	50.350	equipo
TEE – TUBERIA HIDRAULICA	63.475	equipo
CALENTADORES	40.585	equipo
BOMBAS	5.000	equipo
COLUMNA DE DESTILACION	75.350	equipo
TUBERÍA	50.800	equipo
INTERCAMBIADORES DE CALOR	87.860	equipo
SUELDOS Y SALARIOS	100.000	
<b>TOTAL COSTO</b>	<b>513.920</b>	

*Segun Equipment costs, plant desigs economics for chemical.*

### 5.3 ANÁLISIS DE COSTO – BENEFICIO

El análisis de costo beneficio es una herramienta de toma de decisiones para la evaluación de la viabilidad financiera y social de un proyecto. Implica comparar costos asociados con la implementación del proyecto, incluyendo los costos iniciales y operativos, con los beneficios que se esperan tener, ya sea financieros o sociales, a continuación, desarrollamos el cálculo de los parámetros que nos permiten analizar la viabilidad del proyecto:

#### 5.3.1 Cálculo del Valor Presente Neto

El cálculo del valor presente neto restando los costos actuales del valor presente de los beneficios futuros. Un VPN positivo indica que los beneficios superan los costos y sugiere que el proyecto es económicamente viable.

$$VPN = \sum \frac{(\text{Flujo de efectivo neto durante un solo periodo})}{(1 + \text{Tasa de descuento})^{n^{\circ} \text{ de periodos}}}$$

#### 5.3.2 VPN de costos iniciales

Es definido por los costos iniciales que demandaría el proyecto y se tiene lo siguiente:

$$VPN = \frac{18.908.250,04}{(1 + 0.1)^1} = 17.189.318,21 \$$$

### 5.3.3 VPN de costos operativos y de mantenimiento anuales

Implica los costos que hipotéticamente se darían por sucesos en la planta piloto de la producción de Jet Fuel dentro de los próximos 5 años.

$$VPN_1 = \frac{18.908.250,04}{(1 + 0.1)^1} + \frac{18.908.250,04}{(1 + 0.1)^2} + \frac{18.908.250,04}{(1 + 0.1)^3} + \dots + \frac{18.908.205}{(1 + 0.1)^5}$$

$$= 71.677.144,08 \$$$

La elección de la metodología costo beneficio sobre el análisis de flujo de caja se ha fundamentado en consideraciones especiales que resaltan la integridad y la relevancia de este enfoque para el proyecto en cuestión:

- **Consideraciones Temporales y a Largo Plazo.** - Dada la naturaleza a largo plazo del impacto en la integridad de la planta piloto para la producción de Jet Fuel, el análisis de costo beneficio resulta más idóneo para capturar efectos acumulativos y sostenibles a lo largo de los años.
- **Inclusión de Beneficios No Monetarios.** - La flexibilidad de la metodología de costos beneficio ha posibilitado la incorporación de beneficios cualitativos que no necesariamente se expresan en términos monetarios. Este enfoque ha permitido una evaluación más completa de los impactos positivos del proyecto, para satisfacer la demanda interna del país de la producción de jet ful, y la reducción del riesgo ambiental.
- **Análisis de Externalidades Positivas.** - La reducción de costos de mantenimiento y la prolongación de la vida útil de la planta piloto de Jet fuel no solo benefician al operador como tal, sino que también tienen efectos positivos en la seguridad energética y la estabilidad económica regional.

Este enfoque proporciona una herramienta completa y simple para evaluar la viabilidad y los impactos del proyecto de implementación.

#### 5.4 DETERMINACIÓN PRECIO DE VENTA.

El proyecto de producción de Jet fuel para avión hizo el estudio financiero para el arranque en la venta del producto en el cual se demostró que el precio a la venta será de 1.10 \$ teniendo un margen de ganancia 0.25 \$.

Este precio es económico y se ajusta a la demanda interna del país, de esta forma se podrá abastecer nuestro mercado interno, el cual no está subvencionado.

**TABLA 33**

*Costo de venta al mercado*

<b>Precio unitario (bs)/L</b>	<b>5.79</b>	<b>0.83 \$</b>
<b>Margen de ganancias 30% (bs)/L</b>	<b>1.73</b>	<b>0.25 \$</b>
<b>Precio de venta (con factura) (bs)/L</b>	<b>7.52</b>	<b>1.10 \$</b>

*Fuente: Elaboración propia en base*

En la tabla 33, se muestra los costos que actualmente se utilizan en nuestro país que es de 7.65 bs el litro a la venta de Jet fuel para aviones, los cuales están subvencionados por el gobierno. Siendo el costo real de 12,48 bs el litro sin subvención.

**TABLA 34**

*Costos de productos*

<b>PRODUCTO</b>		<b>PRECIO FINAL</b>
<b>Diesel Oil Internacional</b>	Bs/L	8.97
<b>Gas Natural Vehicular Internacional</b>	Bs/m3	3.16
<b>Jet Fuel Internacional (Aeropuerto)</b>	Bs/L	<b>7.65</b>
<b>Gasolina Especial + Internacional</b>	Bs/L	8.68

*Según la revista de la ANH*

## CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

- La diversificación de las fuentes de combustible hacia opciones basadas en vegetales contribuye a reducir la dependencia de los combustibles fósiles, que son finitos y contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero. Utilizar recursos vegetales renovables puede mitigar los riesgos asociados con la disponibilidad limitada de combustibles fósiles.
- Utilizar biocombustibles generar productos derivados de los aceites de vegetales, reduce el consumo de combustible fósiles que son contaminantes del medio ambiente, el flujo volumétrico 10,040 Barril/día, este dato cumple el volumen de jet Fuel A-1 necesario para satisfacer la demanda interna del país fue de 15.500 m<sup>3</sup>/mes; sin embargo, todo el conjunto de refinerías solo produjo 8.024,1 m<sup>3</sup>/mes, por lo que se hizo en la simulación se cubre de la demanda interna con 13,277.45 m<sup>3</sup>/mes.
- Se logró diseñar en Hysys el proceso de Hidrocracking para la obtención de Jet Fuel con los parámetros favorables, se ha logrado obtener los valores óptimos, ya que se hizo máximos y mínimos para obtener presiones y temperaturas mediante la simulación, con sus correspondientes flujos masicos y volumétricos como se muestra en la tabla:

<b>Variable del proceso</b>	<b>Dato de Simulación (Max y min)</b>	<b>Datos Calculados optimizados</b>
<b>Temperatura ( °C)</b>	185,4 a 270,8	261,14
<b>Presión (bar)</b>	1,9 a 2,249	2,437
<b>Flujo volumétrico (Barril/día)</b>	10,040	8,965
<b>Flujo masico (kg/h)</b>	53,86	51,189

- Se logró realizar teóricamente jet fuel a partir de aceites vegetales mediante el proceso de hidrocracking para la refinería Gualberto Villarroel a través de la simulación en Hysys con los modelos de optimización de manera eficiente y aplicada obteniendo los resultados óptimos.
- Se ha realizado un análisis de factibilidad técnica y económica del proyecto propuesto, afirmando que el proyecto es cualitativamente factible ofreciendo más ventajas que desventajas. La inversión que se necesita para montar la planta es de 6 millones \$us, realizando un análisis en el flujo de caja, en el primer año se recupera la inversión, y a partir del segundo año para adelante va a generar ganancias por 47 millones de \$us haciendo rentable la producción.
- En la siguiente tabla se muestra los precios unitarios que se podría vender en el mercado Bolivia a 7,52 bs (1,10\$) el litro de este resultado muestra que no estaría subvencionado, es más barato que el jet fuel internación que se vende en los aeropuertos 7,65 bs por litro.

**Tabla 32.**

*Costo de venta al mercado*

<b>Precio unitario (bs)/L</b>	<b>5.79</b>	<b>0.83 \$</b>
<b>Margen de ganancias 30% (bs)/L</b>	<b>1.73</b>	<b>0.25 \$</b>
<b>Precio de venta (con factura) (bs)/L</b>	<b>7.52</b>	<b>1.09 \$</b>
<b>PRODUCTO</b>	<b>PRECIO FINAL</b>	
<b>Jet Fuel boliviano (Aeropuerto)</b>	<b>Bs/L</b>	<b>7.65</b>

- Que debido a que Bolivia cuenta con petrolero liviano no llega a cubrir la demanda interna en la gasolina de aviación. Tenemos que promover tecnologías alternativas y poco a poco ya no estar dependiendo del petróleo si no ya de ver Biotecnologías, como sacar biodiesel de otros aceites como la palma, azucares lípidos, aceite de jatropha, y entre otros.

## 6.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda a la empresa YPFB realizar la obtención de jet fuel orgánico a partir de la isomerización en el proceso de hidro cracking ya que es un proyecto amigable con el ambiente y económico, además que llega a reemplazar al combustible ya conocido y utilizado.
- Este biocombustible es una alternativa en esta época consumista y de gran demanda ya que ayuda a conservar y estimular el uso de los hidrocarburos alternativos como ser los biocombustibles, el uso de energías renovables es un requisito imperativo para la transición de la matriz energética basada en combustibles fósiles a emisiones globales cero de carbón en el sector energético.
- Por otra parte, es necesario que los trabajadores de la empresa conozcan sobre métodos de optimización de procesos para utilizar el mínimo de materia prima y obtener el máximo de rendimiento de biocombustibles y es necesario tener en el equipo alguien especializado en análisis numérico y optimización de procesos. Se recomienda desarrollar más investigación respecto a la optimización y simulación de bioprocesos ya que es la nueva tentativa en la investigación química y en los procesos de la ingeniería química.
- Todavía Bolivia aún se encuentra en desarrollo de estos tipos de investigación y es necesario plantear modelos matemáticas que utilicen estos procesos para poder garantizar el uso de energía adecuada a partir de valores mínimos de costos y cantidades mínimas de materia prima.
- Realizar un estudio sobre la purificación de los triglicéridos que son los aceites grasos vegetales para aprovechar al máximo todos los productos y subproductos para la obtención de biodiesel para avión.

## BIBLIOGRAFÍA.

Gentry A.R. Hunter, M.G. and Miller R.B. (1994) "Incorporation of hydrocracking and residue FCC in a complex conversion refinery", King Fahd University of Petroleum and Minerals Workshop on Residue and Heavy Oil Upgrading, Saudi Arabia.

Hamed Naderi, Saeid Shokri & Seyed Javad Ahmadpanah (2016), Optimization of kinetic lumping model parameters to improve products quality in the hydrocracking process, Brazilian Journal of Chemical Engineering.

WISDOM, L.I (1995): "Second generation ebullated-bed Technology for high metals feedstock's", Primer foro de avances en la industria de la refinación, Mexico City, Mexico.

Dr. Guillermo Gonzales Sanchez – Juan Antonio Alfonso Alvarez (2015), "Obtención de biodiesel a partir de aceites usados en casa habitación de la comunidad del refugio", maestría en ciencias de energías renovables con especialidad en biomasa.

ASTM procedure D4870-92 (procedure IP-375/94), "Total Sediment in Residual Fuel Oils-part 1 determination by hot filtration" and procedure IP-390/94, Total Sediment in Residual Fuel Oils-part 2 determination using Standard Procedure for Agin".

Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 3rd ed. (New York: John Wiley and Sons, 1978).

Segovia Flores, Espinoza Alarcon, (2023). "Análisis comparativo de la combustión de mezclas diésel - biodiésel mediante el uso del software Aspen Plus V.11".

Ignacio Jesús Sierra (2017) en su proyecto Evaluación del uso de cracking catalítico en la producción de hidrógeno a partir de petróleo pesado realizó un estudio del estado del arte del uso del craqueo catalítico de petróleo en procesos industriales.

Cristian Freire Ordóñez (2018), en su investigación Optimización del proceso de obtención de biodiesel de una empresa de producción, mediante simulación, concluye que las oportunidades de mejora encontradas con la implementación de procesos de producción permitieron determinar las cantidades de materia prima apropiadas para obtener una eficiencia del 91% utilizando materia prima.

Tanmay Chaturvedi-Mette Hedegarrard Thonmsen, (2021) “Simulación de procesos y evaluación tecnoeconomica de salicorniasp. Refineria de combustible para aviones a través de hermetia, conversión de azucares a lípidos”.

Browning, B., Afanasieva, P., Pitaultb, I., Couenneb, F. and Tayakout-Fayollea, M., Detailed kinetic modelling of vacuum gas oil hydrocracking using bifunctional catalyst: A distribution approach. Chemical Engineering Journal, 15, 270-284 (2016).

Canan, U. and Arkun, Y., Steady-state modeling of an industrial hydrocracking reactor by discrete lumping approach. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (2012).

Elizalde, I. and Ancheyt, J., On the detailed solution and application of the continuous kinetic lumping modeling to hydrocracking of heavy oils. Fuel, 90, 3542-3550 (2011). Elizalde, I., Rodriguez, M. A. and Ancheyta, J., Modeling the effect of pressure and temperature on the hydrocracking of heavy crude oil by the continuous kinetic lumping approach. Applied Catalysis A: General, 382, 2, 15, 205-212 (2010).

### **Sitios web**

<https://www2.ypfb.gob.bo/index.php/component/phocadownload/category/67-066-venta-de-crudo-reconstituido-para-el-mercado-externo-en-cisterna-gestion-2020-ypfb-me-co-1-20?download=188:documento-base-de-venta> pag. 13 y 14.

<https://www.google.com/search?q=Bolivia%3A+Decreto+Supremo+N%C2%BA+2741%2C+27+de+abril+de+2016&oq=Bolivia%3A+Decreto+Supremo+N%C2%BA+2>

741%2C+27+de+abril+de+2016&aqs=chrome.69i57j69i58j69i61.53720918j0j4&sourceid=chrome.

- Elizalde, I., Mederos, F.S., and Mena-Cervantes, V.Y., Dynamic modeling of adiabatic reactor for hydrocracking of VGO by using of the continuous lumping approach. *Fuel Processing Technology*, 152, 200-206 (2016). Froment, G. F. Single event kinetic modeling of complex catalytic processes. *Catalysis Reviews: Science and Engineering*, 47, 83-124 (2005).
- Govindhakannan, J. and Riggs, J. B. On the construction of a continuous concentration-reactivity function for the continuum lumping approach. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 46(5), 1653- 1656 (2007).
- Kumar, V. and Balasubramanian, P., Kinetic parameter estimation in hydrocracking using hybrid particle swarm optimization. *Fuel*, 88, 2171-2180 (2009). Khorasheh, F., Zainali, H., Chan, E. C. and Gray, M. R., Kinetic modeling of bitumen hydrocracking reactions. *Petroleum & Coal*, 43 (3-4), 208-18 (2001).
- Kennedy, J., Eberhart, R. C., Particle Swarm Optimization. *Proceedings of IEEE Conference on Neural Network*, 4, 1942-1948 (1995). Laxminarasimhan, C.S., Verma, R.P., Ramachandran, P.A., Continuous lumping model for simulation of hydrocracking, *AIChE Journal*. 42, 9, 2645-2653 (1996).
- Matos, E. M. and Guirardello, R., Modeling and simulation of a pseudotwo-phase gas-liquid column reactor for thermal hydrocracking of petroleum heavy fractions. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 19, 3, 319-334 (2002).
- Moghadassi, A. Amini, N., Fadavi O. and Bahmani, M., Hydrocracking lumped kinetic model with catalyst deactivation in arak refinery hydrocracker unit. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 1, 1, 31-37 (2011).
- Puron, H., Arcelus-Arrillaga, P., Chin, K.K., Pinilla, J.L., Fidalgo, B. and Millan, M., Kinetic analysis of vacuum residue hydrocracking in early reaction stages. *Fuel*,

117, 408-414 (2014). Qader, S. A. and Hill, G. R., Hydrocracking of gas oil. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 8(1), 98 (1969).

Rana M. S., Samano V., Ancheyta J. and Diaz J. a. I., A review of recent advances on process technologies for upgrading of heavy oils and residua. *Fuel*, 86, 12, 16-31 (2007).

Sahu, R., Song, B.J., Im, J.S., Jeon, Y.P., Lee, C.W., A review of recent advances in catalytic hydrocracking of heavy residues. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 27, 12-24 (2015).

Santos, L. S., Pagano, R. L., Calado, V. M. A. and Biscaia Jr., E. C., Optimization of a pultrusion process using finite difference and particle swarm algorithms. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 32, 2, 543-553 (2015).

Sadighi, S. and Ahmad, A., An optimization approach for increasing the profit of a commercial VGO hydrocracking process. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 91, 1077-1091 (2013).

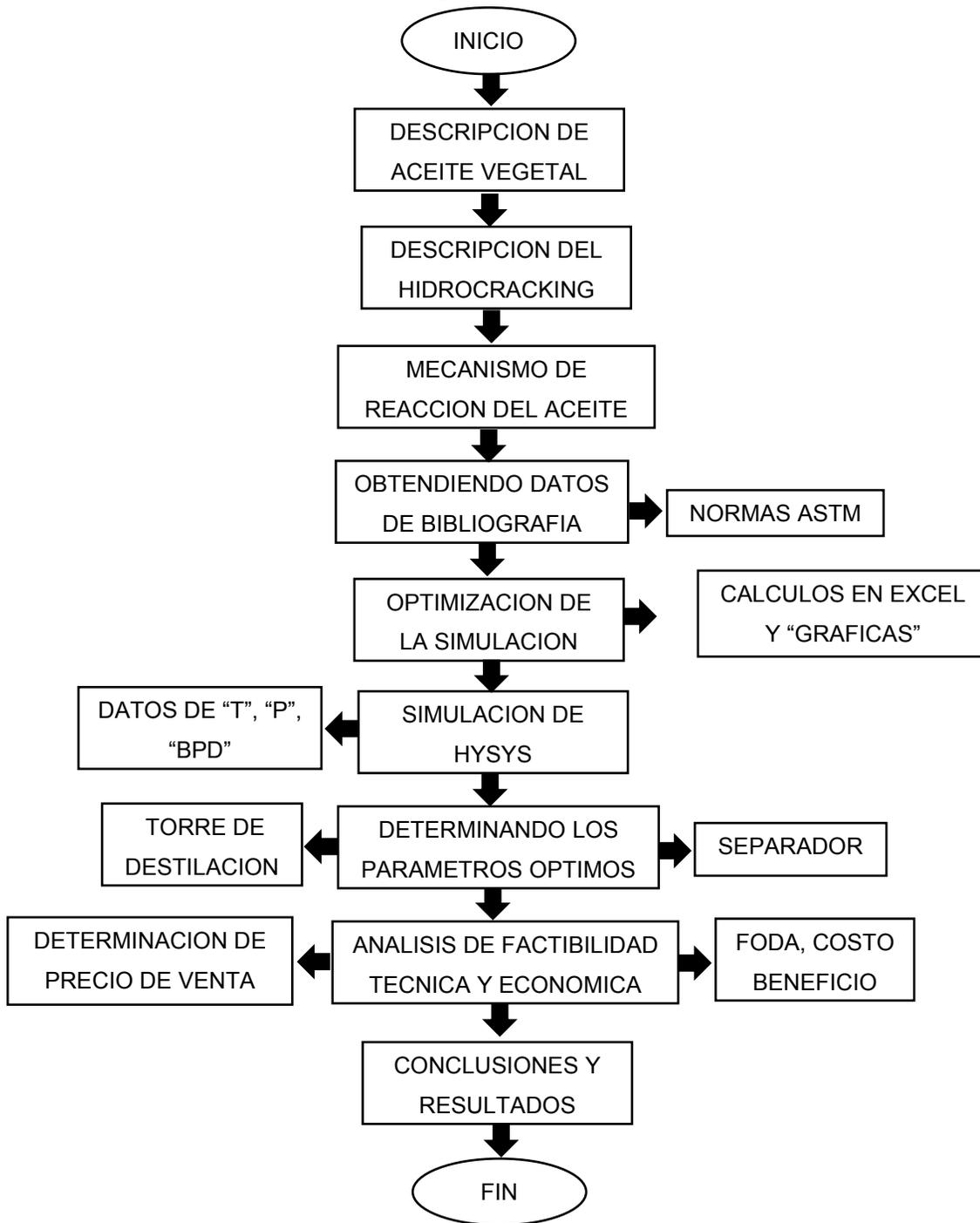
Shokri, S., Sadeghi, M. T., Ahmadi Marvast, M., High reliability estimation of product quality using support vector regression and hybrid meta-heuristic algorithms. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45, 2225-2232 (2014).

Stangeland, B. E., Kinetic Model for prediction of hydrocracker yields. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 13, 72 (1974).

Stangeland, B. E. and Kittrell, J. R., Jet fuel selectivity in hydrocracking. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 11(1), 15-20 (1972).  
Valavarasu, G., Bhaskar, M. and Balarman, K. S., *Petroleum Science and Technology*, 21, 1185-1205 (2003). Zhou, H., L

## DIAGRAMA DE BLOQUES 1.

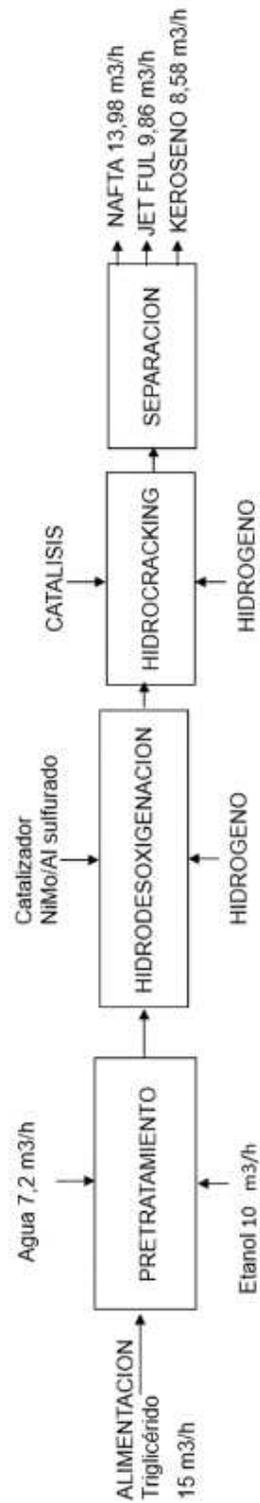
### Metodología a Emplear



FUENTE: Elaboración Propia

## DIAGRAMA DE BLOQUES 2.

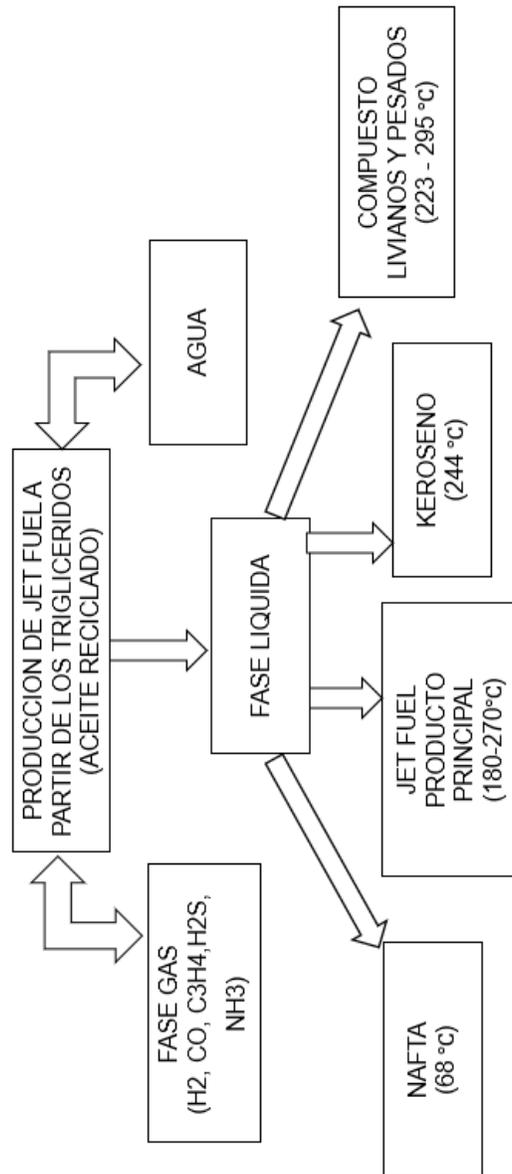
Elaboración por el HYSYS Obtención de Jet – Ful



FUENTE: Elaboración Propia

### DIAGRAMA DE BLOQUES 3.

#### Obtención de jet – Fuel y otros componentes



Fuente: Elaboración propia

## ANEXOS

### ANEXOS A: Datos de la optimización

Tabla A. 1: Relación de Temperatura del Separador y flujo másico de Separador obtenido

T (C)	M (Kgr/hr)
200	10250
202	10300
203	10400
204	10550
208	10620
212	10740
216	10860
220	10980
222	11000
223	11100
224	11220
225	11270
229	11272
233	11265
237	11220
241	11147
245	11113
249	11102

Fuente: Elaborado en base a datos recopilados, 2022

Tabla A. 2: Relación de Presión interna del Separador y flujo másico de separador obtenido

P (bar)	M (Kmol/hr)
12	280
13	350
14	362
15	368
16	370,56
17	371,72
18	372,21
19	372,76
20	371,65
21	371

22	370,34
23	369,76
24	364
25	362
26	360
27	358
28	352
29	350,34
30	349,78
31	347
32	342
33	340,23
34	338,56
35	334,45
36	330
37	325
38	320
39	317,23
40	315

*Fuente: Elaborado en base a datos recopilados, 2022*

**Tabla A. 3: Relación de Volumen de agua y flujo másico de separador obtenido**

Vw (m3/hr)	M (Kmol/hr)
11,23	352,1572
11,47	352,1542
11,62	352,1561
12	352,1628
12,12	352,1632
12,23	352,1643
12,5	352,1651
12,62	352,16513
12,78	352,16517
13	352,1652
13,23	352,1673
13,37	352,1687
13,5	352,17
13,62	352,1712
13,87	352,1732
14	352,1751

14,23	352,1764
14,37	352,1783
14,5	352,1789
14,64	352,1795
14,85	352,1812
15	352,1852
15,12	352,1862
15,32	352,1872
15,5	352,1882
15,57	352,1892
15,9	352,1902
16	352,1921
16,12	352,1934
16,43	352,1947
16,5	352,196
16,59	352,1973
16,78	352,1986
17	352,2021
17,23	352,2056
17,41	352,2091
17,5	352,2126

**Fuente:** Elaborado en base a datos recopilados

**Tabla A. 4: Relación de Altura del separador y Temperatura**

L (m)	T (C)
0	225
0,15	231,62
0,25	238,24
0,5	244,86
0,65	251,48
0,75	253
1	257
1,15	260,13
1,25	263,26
1,5	266,39
1,65	273
1,75	279,98
2	283
2,15	279,45

2,25	279,12
2,5	278,79
2,65	278,46
2,75	277,2
3	276
3,15	274,12
3,25	273,34
3,5	272,56
3,65	271,78
3,75	271
4	270
4,15	268,56
4,25	267,12
4,5	265,68
4,65	265,12
4,75	264,56
5	264
5,15	263,345
5,25	262,69
5,5	262,035
5,65	261,38
5,75	260,725
6	257
6,25	256,1

**Fuente:** Elaborado en base a datos recopilados

**Tabla A. 5: Relación de altura del separador y flujo másico obtenido**

L (M)	M (Kgr/hr)
0	800
0,15	1200
0,25	1700
0,5	2000
0,65	2350
0,75	3200
1	4000
1,15	4890
1,25	5500
1,5	6150
1,65	6500

1,75	6870
2	7100
2,15	7350
2,25	7600
2,5	7850
2,65	8100
2,75	8150
3	8200
3,15	8320
3,25	8440
3,5	8560
3,65	8680
3,75	8800
4	9000
4,15	9120
4,25	9240
4,5	9360
4,65	9480
4,75	9600
5	9650
5,15	9720
5,25	9790
5,5	9860
5,65	9930
5,75	10000
6	10200
6,25	10275

**Fuente:** *Elaborado en base a datos recopilados*

**ANEXOS B:**

**Flujo de caja proyectada a 5 años.**

<b>FLUJO DE CAJA PROYECTADA A 5 AÑOS</b>					
<b>INGRESOS</b>	2023	2024	2025	2026	2027
<b>INFLACION</b>					
<b>SALDO INICIAL</b>	0	18,908,250 .04	47,395,460 .08	91,910,680. 12	161,296,95 0.16
<b>SALDO MES ANTERIOR</b>	0				
<b>INGRESO POR LA VENTA</b>	19,159,920 .00	28,739,880 .00	44,767,890 .00	69,638,940. 00	108,189,06 7.50
<b>TOTAL INGRESOS</b>	19,159,920 .00	47,648,130 .04	92,163,350 .08	161,549,62 0.12	269,486,01 7.66
<b>EGRESOS</b>					
<b>Gerente de planta</b>	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000
<b>Supervisor de mantenimiento</b>	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000
<b>Técnico de mantenimiento</b>	36,000	36,000	36,000	36,000	36,000
<b>Gerente laboratorio</b>	42,000	42,000	42,000	42,000	42,000
<b>Carga laboral</b>	54,059.40	54,059.40	54,059.40	54,059.40	54,059.40
<b>AGUA (M3)</b>	18,610.56	18,610.56	18,610.56	18,610.56	18,610.56
<b>ENERGIA ELECTRICA</b>	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000
<b>COMPUTADORAS</b>	5,000	0	0	0	0
<b>MATERIAL DE ESCRITORIO</b>	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
<b>TOTAL, EGRESO</b>	251,669.96	252,669.96	252,669.96	252,669.96	252,669.96
<b>SALDO DE CAJA</b>	18,908,250 .04	47,395,460 .08	91,910,680 .12	161,296,95 0.16	269,233,34 7.70

*Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos en Excel.*



**ANEXOS D:**

**Tabla de simulación de Hysys de flujos de materiales**

		Material Streams											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Vapour Fraction		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Temperature	F	100.0	280.1	259.9	280.1	450.0	450.0	450.0	450.0	450.0	450.0	450.0	375.1
Pressure	psia	314.7	308.6	308.6	308.6	274.7	274.7	274.7	274.7	274.7	274.7	274.7	150.0
Molar Flow	lbmole/hr	4409	4409	4417	7.302	4417	0.0000	4417	0.0000	0.0000	0.0000	4417	416.3
Mass Flow	lb/hr	1.008e+006	1.008e+006	1.009e+006	131.5	1.009e+006	0.0000	1.009e+006	0.0000	0.0000	0.0000	1.009e+006	7500
Liquid Volume Flow	barrel/day	7.935e+004	7.935e+004	7.935e+004	9.025	7.935e+004	0.0000	7.935e+004	0.0000	0.0000	0.0000	7.935e+004	514.8
Heat Flow	Btu/hr	-9.175e+008	-8.384e+008	-8.392e+008	-8.707e+005	-7.282e+008	0.0000	-7.282e+008	0.0000	0.0000	0.0000	-5.841e+008	-4.222e+007
Vapour Fraction		1.0000	0.0000	0.0000	0.0022	1.0000	0.0037	1.0000	0.0022	1.0000	0.0006	0.0006	0.0000
Temperature	F	155.0	155.0	155.0	649.9	300.0	395.6	300.0	472.1	300.0	518.3	518.3	280.1
Pressure	psia	20.80	20.80	20.80	36.69	35.49	28.53	35.49	30.57	35.49	32.61	32.61	150.0
Molar Flow	lbmole/hr	6.285e-004	2130	812.4	1161	138.8	667.7	138.8	381.0	138.8	97.14	97.14	1110
Mass Flow	lb/hr	3.948e-002	2.202e+005	1.464e+004	5.485e+005	2500	1.188e+005	2500	9.142e+004	2500	2.972e+004	2.972e+004	2.000e+004
Liquid Volume Flow	barrel/day	4.187e-003	2.110e+004	1004	3.863e+004	171.5	1.004e+004	171.5	7334	171.5	2279	2279	1372
Heat Flow	Btu/hr	-43.49	-1.956e+008	-9.851e+007	-3.288e+008	-1.414e+007	-9.216e+007	-1.414e+007	-8.478e+007	-1.414e+007	-2.028e+007	-1.324e+008	
Vapour Fraction		0.6313	0.8366	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	1.0000
Temperature	F	582.8	759.9	500.0	398.4	698.5	433.5	564.5	518.3	518.3	518.3	518.3	518.3
Pressure	psia	36.69	3.481	164.8	0.9572	1.198	0.9943	1.068	32.61	32.61	32.61	32.61	32.61
Molar Flow	lbmole/hr	2271	2271	1110	2545	288.2	139.4	408.8	97.14	97.14	53.42	43.71	3.255e-002
Mass Flow	lb/hr	5.689e+005	5.689e+005	2.000e+004	1.277e+005	2.316e+005	4.927e+004	1.803e+005	2.972e+004	2.972e+004	1.634e+004	1.337e+004	1.251
Liquid Volume Flow	barrel/day	4.000e+004	4.000e+004	1372	9591	1.522e+004	3681	1.288e+004	2279	2279	1254	1026	9.294e-002
Heat Flow	Btu/hr	-4.612e+008	-3.718e+008	-1.114e+008	-2.817e+008	-1.308e+008	-3.614e+007	-1.187e+008	-2.028e+007	-1.114e+007	-9.115e+006	-3403	
Vapour Fraction		0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0006	0.0002	1.0000	0.0000	0.0000			
Temperature	F	518.3	518.4	520.0	518.3	519.4	519.4	519.4	519.4	519.4			
Pressure	psia	32.61	50.76	43.51	32.61	32.61	32.61	32.61	32.61	32.61			
Molar Flow	lbmole/hr	53.39	53.39	53.39	29.29	14.42	82.68	1.934e-002	82.66				
Mass Flow	lb/hr	1.634e+004	1.634e+004	1.634e+004	8960	4413	2.630e+004	0.7499	2.530e+004				
Liquid Volume Flow	barrel/day	1254	1254	1254	687.2	338.5	1941	5.577e-002	1941				
Heat Flow	Btu/hr	-1.114e+007	-1.114e+007	-1.112e+007	-6.107e+006	-3.008e+006	-1.723e+007	-2024	-1.722e+007				

Fuente: Elaboración propia de la simulación Hysys

## ANEXOS E:

**Tabla de simulación de Hysys de flujos del separador**

T-101		
Spec Value(1)		C
Spec Value(2)	331.2	m3/h
Spec Value(3)	83.33	C
Spec Value(4)	58.17	m3/h
Spec Value(5)	85.35	m3/h
Spec Value(6)		kgmole/h
Spec Value(7)	147.7	m3/h
Spec Value(8)	370.3	C
Spec Value(9)	501.7	C
Spec Value(10)	582.7	C
Spec Calc Value(1)	50.39	C
Spec Calc Value(2)	331.2	m3/h
Spec Calc Value(3)	83.33	C
Spec Calc Value(4)	15.06	m3/h
Spec Calc Value(5)	88.51	m3/h
Spec Calc Value(6)	1171	kgmole/h
Spec Calc Value(7)	147.7	m3/h
Spec Calc Value(8)	370.3	C
Spec Calc Value(9)	501.7	C
Spec Calc Value(10)	582.7	C

*Fuente: Elaboración propia de la simulación Hysys*

## ANEXOS F:

**Tabla de simulación de Hysys de flujos de la torre de destilacion**

T-100		
Spec Value(1)	139.8	m3/h
Spec Value(2)	0.0000	kgmole/h
Spec Value(3)	<empty>	kgmole/h
Spec Value(4)	50.35	m3/h
Spec Value(5)	52.15	m3/h
Spec Value(6)	15.10	m3/h
Spec Value(7)	165.6	m3/h
Spec Value(8)	99.37	m3/h
Spec Value(9)	66.24	m3/h
Spec Value(10)	93.33	C
Spec Value(11)	121.1	C
Spec Value(12)	176.7	C
Spec Value(13)	343.3	C
Spec Value(14)	273.9	C
Spec Value(15)	340.6	C
Spec Value(16)	398.9	C
Spec Calc Value(1)	139.8	m3/h
Spec Calc Value(2)	2.823e-004	kgmole/h
Spec Calc Value(3)	526.6	kgmole/h
Spec Calc Value(4)	66.49	m3/h
Spec Calc Value(5)	48.58	m3/h
Spec Calc Value(6)	15.10	m3/h
Spec Calc Value(7)	165.6	m3/h
Spec Calc Value(8)	99.37	m3/h

*Fuente: Elaboración propia de la simulación Hysys*

**ANEXOS G:**  
**Principio de Optimización**

El principio utilizado es el de la maximización decir que se utiliza el valor máximo aplicando funciones derivadas.

Para entender el método de los multiplicadores de Lagrange ilustraremos las ideas con un ejemplo:

**Ejemplo** Sea  $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  dada por:

$f(x,y) = (x + 1)^2 + y^2$  En este caso vamos a encontrar los puntos críticos:

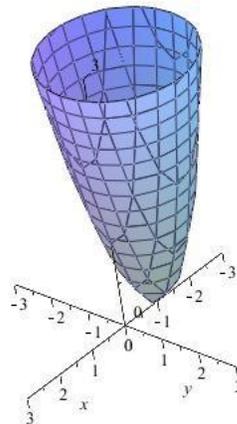
$$\nabla f(x, y) = (2(x + 1), 2y) \Rightarrow \nabla f(x, y) = (0, 0) \Leftrightarrow \begin{cases} 2(x + 1) = 0 \\ 2y = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x = -1 \\ y = 0 \end{cases}$$

por lo tanto el único punto crítico es  $(-1,0)$  para ver si es máximo o mínimo nos fijamos que en la función:

$$f(x,y) = (x + 1)^2 + y^2 \Rightarrow f(x,y) \geq 0$$

en este caso cuando evaluamos en el punto crítico  $(-1,0)$  se tiene:

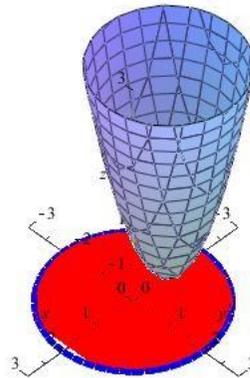
$$f(-1,0) = (-1 + 1)^2 + 0^2 = 0$$



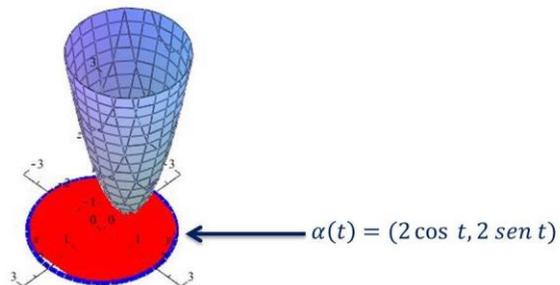
por lo que podemos decir que el punto  $(-1,0)$  es un punto mínimo.

La pregunta ahora es si la función alcanza un valor máximo, para ello debemos restringir el dominio de la función, en este caso al conjunto:

$$\{(x,y) \in \mathbb{R}^2 \mid \| (x,y) \| \leq 2\}$$



en la parte roja se calculó que  $f$  alcanzaba un valor mínimo en  $(-1,0)$  falta ver lo que ocurre en la frontera del conjunto, es decir en la parte azul. Esta parte se puede parametrizar:



donde  $\alpha : [0, 2\pi] \rightarrow \mathbb{R}^2$

De encontrar el punto máximo de las curvas horas en este caso las coberturas formadas por los datos obtenidos de la simulación.



**DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR  
Y DERECHOS CONEXOS  
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-1162/2024  
La Paz, 12 de abril de 2024**

**VISTOS:**

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **05 de abril de 2024**, por **SERGIO ALEJANDRO COSSIO SOLIZ** con **C.I. N° 10901147 LP**, con número de trámite **DA 607/2024**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: **"PRODUCCIÓN DE JET FUEL A PARTIR DE ACEITES VEGETALES MEDIANTE EL PROCESO DE HIDROCRACKING PARA LA REFINERÍA GUALBERTO VILLARROEL A TRAVÉS DE LA SIMULACIÓN EN HYSYS"**, cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

**CONSIDERANDO:**

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el *"Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración"*.

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece *"Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión"*. En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: *"la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios"*

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: *"...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial"*

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley N° 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: *"... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena"*



fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

**POR TANTO:**

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas.

**RESUELVE:**

**INSCRIBIR** en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: **"PRODUCCIÓN DE JET FUEL A PARTIR DE ACEITES VEGETALES MEDIANTE EL PROCESO DE HIDROCRACKING PARA LA REFINERÍA GUALBERTO VILLARROEL A TRAVÉS DE LA SIMULACIÓN EN HYSYS"** a favor del autor y titular: **SERGIO ALEJANDRO COSSIO SOLIZ** con **C.I. Nº 10901147 LP** bajo el seudónimo **ALECOSS**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

CASA/lm

Firmado Digitalmente por:

Servicio Nacional de Propiedad Intelectual - SENAPI  
**CARLOS ALBERTO SORUCO ARROYO**  
**DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS**  
LA PAZ - BOLIVIA



Firma:



IzrMt7Yu8Su17K

PARA LA VALIDACIÓN DEL PRESENTE DOCUMENTO INGRESAR A LA PÁGINA WEB [www.senapi.gob.bo/verificacion](http://www.senapi.gob.bo/verificacion) Y COLOCAR CÓDIGO DE VERIFICACIÓN O ESCANEAR CÓDIGO QR.



Oficina Central - La Paz  
Av. Montes, Nº 515,  
entre Esq. Uruguay y  
C. Batallón Illimani.  
Telfs.: 2115700  
2119276 - 2119251

Oficina - Santa Cruz  
Av. Uruguay, Calle  
prolongación Quijarro,  
Nº 29, Edif. Bicentenario.  
Telfs.: 3121752 - 72042936

Oficina - Cochabamba  
Calle Bolívar, Nº 737,  
entre 16 de Julio y Antezana.  
Telfs.: 4141403 - 72042957

Oficina - El Alto  
Av. Juan Pablo II, Nº 2560  
Edif. Multicentro El Ceibo  
Ltda. Piso 2, Of. 5B,  
Zona 16 de Julio.  
Telfs.: 2141001 - 72043029

Oficina - Chuquisaca  
Calle Kilómetro 7, Nº 366  
casi esq. Urriagoitia,  
Zona Parque Bolívar.  
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija  
Av. La Paz, entre  
Calles Ciro Trigo y Avaroa  
Edif. Santa Clara, Nº 243.  
Telf.: 72015286

Oficina - Oruro  
Calle 6 de Octubre, Nº 5837,  
entre Ayacucho  
y Junín, Galería Central,  
Of. 14.  
Telf.: 67201288

Oficina - Potosí  
Av. Villazón entre calles  
Wenceslao Alba y San Alberto,  
Edif. AM. Salinas Nº 242,  
Primer Piso, Of. 17.  
Telf.: 72018160



**AUTOR: SERGIO ALEJANDRO COSSIO SOLIZ**

CORREO: [alejandroache758@gmail.com](mailto:alejandroache758@gmail.com)

CELULAR: 72568266