

**Estudio Técnico De La Implementación De Un Sistema De Transporte Por Tubería De
Aceite De Palma Blanqueado Desde ECODIESEL Hacia La Planta De Parafinas Para La
Integración De Combustibles Renovables En La Refinería De Barrancabermeja**

Iván Darío Moros Meneses y Mitchun Alexander Zapata Giraldo

**Trabajo de Grado para Optar al Título de
Ingeniería de Procesos de Refinación y Petroquímicos**

Director

Diana Duarte Duarte

Ingeniera química, PhD

Carlos Augusto Godoy Ruiz

Codirector

Ingeniero Químico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías físico - químicas

Escuela de Ingeniería Química

Ingeniería en Procesos de Refinación y Petroquímicos

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

A Dios por permitirme alcanzar un logro más en mi vida, por regalarme sabiduría en cada decisión, por mi salud y la de mis seres queridos. Infinitas gracias por todas sus bendiciones.

A mi vieja que muy seguramente estará orgullosa de verme alcanzar este nuevo logro, gracias por darme la vida y por enseñarme a vivirla de la manera adecuada.

A mi maestro de vida, que me enseñó a crecer, a ser la persona que hoy en día soy y a ratificar que es más fácil vivir, si se escucha a los padres. Gracias mi viejo.

A mi compañera Dalgis Cadena Núñez, por su lealtad, por ayudarme a surgir, por hacerse cargo de todo en mi ausencia, pero especialmente por ser ese gran ejemplo “la patrona” para mis hermosos hijos.

A mis hijos Camila Alexandra y Samuel Alexander por ser esos grandes seres humanos, por cambiar mi vida, por ser la más linda bendición que Dios me regaló y por impulsarme día a día a alcanzar cada objetivo propuesto, definitivamente son mi todo.

Mitchun Alexander Zapata Giraldo

Dedicatoria

A Dios por bendecirnos nuestra vida, por ser nuestro guía a lo largo de nuestra existencia, por ser el apoyo y fortaleza en los momentos de debilidad y dificultad.

A mi madre Elizabeth, por ser siempre la principal promotora de mis sueños. Gracias por ser ejemplo de trabajo duro y valentía; de no temer a las adversidades; por confiar y creer en mis expectativas, por sus consejos, valores y principios inculcados.

A mi compañera de vida Stephanny, tu ayuda y motivación ha sido fundamental en los momentos más difíciles en la elaboración de este proyecto de grado. Te lo agradezco infinitamente mi amor.

A mis hijos Karol Daniela, Iván Darío, Emmanuel Santiago y Elizabeth, por ser el motor y fuente de inspiración diaria.

A los profesores por su paciencia y disposición en las clases durante estos 5 años de la ingeniería para lograr su culminación.

Iván Darío Moros Meneses

Agradecimientos

A la universidad industrial de Santander y Ecopetrol S.A quienes, a través de este programa de ingeniería, aportaron a mi formación profesional.

Al ingeniero Elkin Humberto Carmona Cuadros, padrino y tutor, por su interés en mi aprendizaje, por su disposición, paciencia y dedicación en la ejecución de este trabajo y sobre todo por su pasión para enseñar.

A los ingenieros Said Mora y Yenny Ostos, por su valiosa amistad, colaboración y muy oportuna ayuda. Van a ser grandes profesionales porque excepcionales seres humanos ya lo son.

A los ingenieros Laura Garzón, Carlos Godoy y muy especialmente a Diana Duarte por su disposición, amistad, acompañamiento durante todo este proyecto y sus valiosa y acertadas sugerencias.

Mitchun Alexander Zapata Giraldo

Agradecimientos

A mi directora, Ingeniera Diana Duarte, por su constante apoyo, sus valiosos aportes, su orientación y dedicación para terminar este proyecto.

A mi tutor Ingeniero Elkin Carmona, por su disposición, enseñanza de conceptos ingenieriles claves y su constante apoyo en todas las etapas de este proyecto.

Al Ingeniero Said, por su sincera amistad y su apoyo desde la coordinación de este programa académico. Todas tus metas se cumplirán amigo.

A mi compadre Mitchun Alexander, quien con su insistencia logró convencerme para que ingresara a esta ingeniería. Gracias, hermano.

Al ingeniero Carlos Godoy y Laura Garzón, por sus importantes aportes durante todas las etapas del proyecto.

A Ecopetrol y la Universidad Industrial de Santander por la creación de este importante programa académico.

Iván Darío Moros Meneses

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos	15
2. Estado del arte	16
2.1 Hidrotratamiento de BPO	19
2.2 Tecnologías existentes	21
2.2.1 <i>Ecofining</i>	21
2.2.2 <i>NextChem & Saola Energy</i>	23
2.2.3 <i>NExBTL</i>	24
3. Metodología	26
3.1 Realizar el levantamiento del trazado de la tubería para el transporte del aceite de palma blanqueado desde ECODIESEL hasta la U1100	26
3.2 Realizar los cálculos de ingeniería para el diseño y dimensionamiento del sistema de transporte del aceite de palma blanqueado	26
3.3 Ejecutar el análisis económico de la implementación del sistema de transporte de BPO diseñado	27
4. Resultados	28
4.1 Variables de transporte a considerar para el aceite de palma blanqueado a través de todo el sistema	28

4.2 Alternativas de trazado	30
4.3 Alternativas de trazado	36
4.3.1 <i>Viscosidad del BPO</i>	36
4.3.2 <i>Efecto de la temperatura en el diseño de transporte por tubería del BPO</i>	36
4.3.3 <i>Cálculo hidráulico a través del programa ASPEN HYSYS®</i>	38
4.3.3.1 Dimensionamiento de la línea.	39
4.4 Modelado del sistema en <i>ASPEN HYSYS®</i>	41
4.5 Selección de equipos y accesorios del sistema	48
4.6 Costo de implementación del sistema de transporte diseñado	50
5. Conclusiones	53
6. Recomendaciones	54
Referencias Bibliográficas	55
Apéndice	59

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Propiedades físicas del aceite de palma blanqueado BPO</i>	28
Tabla 2. <i>Calidad del aceite de palma Blanqueado BPO (Ecopetrol, 2022)</i>	29
Tabla 3. <i>Calidad del aceite de palma Blanqueado BPO (Ecopetrol, 2022)</i>	33
Tabla 4. <i>Calificación de cada criterio evaluado en la alternativa</i>	34
Tabla 5. <i>Criterios de dimensionamiento de líneas para líquidos en general (Tecnología, 2010)</i>	39
Tabla 6. <i>Datos hidráulicos del sistema de bombeo calculados con ASPEN HYSYS®.</i>	47
Tabla 7. <i>Equipos y tuberías necesarios para el diseño del sistema de transporte</i>	49
Tabla 8. <i>Costo de implementación del sistema de transporte diseñado</i>	50
Tabla 9. <i>Costos de transporte por carrotanques</i>	51

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Esquema simplificado de las dos etapas del hidropocesamiento (ETIP, 2018)</i>	20
Figura 2. <i>Esquema general del proceso Ecofining (TM) (Honeywell, 2019)</i>	23
Figura 3. <i>Proceso de producción de diésel renovable con tecnología NextChem (ETIP, 2018)</i>	24
Figura 4. <i>Ubicación geográfica de las alternativas de estudio para el transporte de BPO hasta la planta de parafinas</i>	32
Figura 5. <i>Ubicación geográfica de las alternativas de estudio para el transporte de BPO hasta la planta de parafinas</i>	35
Figura 6. <i>Sistema de calentamiento mediante venas de vapor. (Vega, 2009)</i>	37
Figura 7. <i>Esquema del Modelo en el simulador</i>	41
Figura 8. <i>Perfil de elevación de la línea</i>	42
Figura 9. <i>Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura</i>	43
Figura 10. <i>Perfil de presiones en función de la longitud de tubería</i>	44
Figura 11. <i>Perfil de temperatura en función de la longitud de la tubería sin revestimiento y tracing</i>	45
Figura 12. <i>Perfil de temperatura en función de la longitud de tubería con aislamiento térmico</i>	46

Lista de Anexos

	Pág.
Apéndice A. Propiedades físicas de los fluidos	60
Apéndice B. Alternativas de trazados propuestos	66

Resumen

Título: Estudio Técnico De La Implementación De Un Sistema De Transporte Por Tubería De Aceite De Palma Blanqueado Desde ECODIESEL Hacia La Planta De Parafinas Para La Integración De Combustibles Renovables En La Refinería De Barrancabermeja*

Autores: Iván Darío Moros Meneses y Mitchun Alexander Zapata Giraldo**

Palabras Clave: BPO, Alternativa, Viscosidad, Simulación

Descripción:

Los combustibles de origen fósil tienen una demanda actual del 80% a nivel mundial. Ecopetrol con su compromiso de ser una empresa ambientalmente responsable está implementado proyectos de energías renovables a partir de parques solares, hidrógeno verde y combustibles renovables. La materia prima para la producción de diésel renovable será aceite de palma blanqueado suministrado por ECODIESEL.

El transporte de aceite de palma se realiza a granel en carrotanques, presentando oportunidad en los tiempos de entrega y altos costos en los fletes. El presente trabajo consiste en un estudio técnico para el transporte de BPO desde ECODIESEL hacia la planta de parafinas en la GRB, como la primera etapa del macroproyecto llevado a cabo en Ecopetrol y correspondiente a la integración de combustibles renovables en la refinería de Barrancabermeja. Se evalúan diferentes alternativas de trazado de tubería y se elige la mejor alternativa, teniendo en cuenta variables que influyen en la relación costo/beneficio del proyecto. Además, se estudian las diferentes variables que intervienen en el diseño de la tubería de transporte de BPO y se realiza la simulación de la línea en el simulador de procesos ASPEN HYSYS® con el fin de asegurar los valores requeridos para el diseño del sistema de bombeo y los implementos requeridos para tal fin.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Programa académico Ingeniería de Procesos en Refinación y Petroquímicos. Director: Diana Duarte Duarte. Ingeniera Química, PhD. Codirector: Carlos Augusto Godoy Cruz. Ingeniero Químico

Abstract

Title: Technical Study of the Implementation of a Pipeline Transport System for Bleached Palm Oil from ECODIESEL to the Paraffin Plant for the Integration of Renewable Fuels in the Barrancabermeja Refinery*

Author(s): Iván Darío Moros Meneses y Mitchun Alexander Zapata Giraldo**

Key Words: BPO, Alternative, Viscosity, Simulation

Description:

Fossil fuels have a current demand of 80% worldwide. Ecopetrol, with its commitment to being an environmentally responsible company, is implementing renewable energy projects based on solar parks, green hydrogen, and renewable fuels. The raw material to produce renewable diesel will be bleached palm oil supplied by ECODIESEL.

The transportation of palm oil is carried out in bulk in tank trucks, presenting an opportunity in delivery times and high freight costs. The present work consists of a technical study for the transport of BPO from ECODIESEL to the paraffin plant in the GRB, as the first stage of the macro-project carried out in Ecopetrol and corresponding to the integration of renewable fuels in the Barrancabermeja refinery. Different pipeline layout alternatives are evaluated, and the best alternative is chosen, considering variables that influence the cost/benefit ratio of the project. In addition, the different variables that intervene in the design of the BPO transport pipeline are studied and the simulation of the line is carried out in the ASPEN HYSYS® process simulator to ensure the values required for the design of the pumping system and the implements required for this purpose.

* Degree Work

**Physics-Chemical Engineering faculty. Chemical Engineering School. Director: Diana Duarte Duarte, Chemical Engineer, Ph.D. Co-director: Carlos Augusto Godoy Cruz, Chemical Engineer.

Introducción

Los combustibles de origen fósil comprenden el 80% de la demanda actual de energía primaria a nivel mundial, siendo el sistema energético fuente de aproximadamente dos tercios de las emisiones globales de CO₂ (UN, 2020). Como respuesta a esta y muchas otras preocupaciones en torno al cambio climático, la escasez de recursos y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), varios países incluyendo Colombia, se han sumado a la iniciativa de convertirse en territorios carbono-neutrales para el 2050 como parte del Acuerdo de París (EC, 2019).

Según lo anterior, se podría pensar en el biodiésel, definido por la American Society for Testing and Materials o ASTM (organización de normas internacionales) como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga (FAME) derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasas de animales, y que se emplean en motores de ignición por compresión, como una propuesta para la sustitución parcial de combustibles fósiles a través del blending con otros tipos de combustibles producidos por Ecopetrol, disminuyendo de esta forma las emisiones globales de CO

(Dahman et al, 2019). Sin embargo, existen limitaciones en el porcentaje de biodiesel que puede ser usado en el blending (máximo 12%vol), lo que con lleva a evaluar otro tipo de biocombustible llamado diésel renovable que ha ganado relevancia debido a que presenta las mismas características (o incluso mejores) que el diésel convencional y su porcentaje máximo en el blending es muy superior al del biodiésel (50%vol) (Rincón y Martínez, 2009). Ecopetrol es consciente de su responsabilidad ambiental por lo cual ha considerado la transición energética a combustibles renovables dentro de los múltiples procesos de producción de combustibles

limpios, entre ellos el diésel renovable, puesto que esta última es una de las apuestas más importantes de la compañía de petróleos. La evaluación de producción de diésel renovable a partir de aceite de palma blanqueado (BPO) se realizará en la actual planta de hidrotratamiento U1100, ubicada en el Departamento de Parafinas y Bases Lubricantes, al interior del complejo industrial de la Refinería de Barrancabermeja, la cual actualmente se encuentra fuera de servicio y está siendo intervenida técnicamente en un proyecto alternativo en la búsqueda de lograr las condiciones tanto técnicas, ambientales, de seguridad y económicas para la conversión del aceite de palma a diésel renovable. Esta conversión involucra varios procesos como hidrotratamiento, gasificación, pirólisis y otras tecnologías bioquímicas y termoquímicas (Rincón y Martínez, 2009). No obstante, el primer requisito para garantizar la producción de diésel renovable es asegurar el suministro continuo de la materia prima (BPO) a través de un sistema de transporte por tubería hacia la planta U1100, pues actualmente el aceite de palma es transportado en carrotanques que no aseguran un continuo abastecimiento de esta materia prima y además de que no existen vías adecuadas para estos vehículos que interconecten ECODIESEL (salida del BPO) con el tanque de carga a la unidad U1100.

En este trabajo de investigación se evalúan las diferentes alternativas para el transporte por tubería de aceite de palma blanqueado BPO que servirá como carga a la unidad U1100, teniendo en cuenta la normatividad vigente por Ecopetrol en cuanto a seguridad de procesos, conservación del medio ambiente e integridad de las personas. Específicamente se enfoca en garantizar un suministro continuo del BPO para la producción de diésel renovable a través del diseño de un sistema de transporte por tubería y el estudio técnico-económico preliminar de la implementación de la alternativa propuesta.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar el estudio técnico para la implementación de un sistema de transporte continuo por tubería de aceite de palma blanqueado desde ECODIESEL hacia la planta de parafinas para la integración de combustibles renovables en la Refinería de Barrancabermeja.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar el levantamiento del trazado de la tubería para el transporte del aceite de palma blanqueado desde ECODIESEL hasta la U1100.
- Realizar los cálculos de ingeniería para el diseño y dimensionamiento del sistema de transporte del aceite de palma blanqueado.
- Evaluar los costos de implementación del sistema de transporte diseñado.

2. Estado del arte

Los combustibles de menor intensidad de carbono son aquellos con menores emisiones de gases GEI medidas en g de CO₂eq y en su mayor parte, no son derivados del petróleo. Algunos ejemplos de estos combustibles son: etanol desnaturalizado, gas natural (comprimido o licuado), gas licuado de petróleo, hidrógeno, combustibles derivados de materiales biológicos (biocombustibles) y energía solar. Dentro del grupo de biocombustibles algunos de los principales combustibles que dominan el mercado son el etanol producido a partir de la caña de azúcar y el biodiésel producido a partir de la transesterificación del aceite de soya, colza y palma (EESI, 2021). Este tipo de combustibles mantienen su relevancia debido a que no se tiene aún la cantidad necesaria de vehículos eléctricos ni la infraestructura para reemplazar la actual flota de vehículos con motores de combustión dependientes de combustibles fósiles como el diésel o la gasolina.

El biodiésel es uno de los biocombustibles más usados en mezclas con el diésel convencional. Sin embargo, debido a su naturaleza, el biodiésel presenta ciertas desventajas como: menor poder calorífico con un mayor consumo de combustible, mayor viscosidad y densidad con posibles problemas de fluidez en climas fríos, ácidos grasos inestables que pueden generar residuos durante las reacciones de oxidación y ocasionar obstrucciones (EPA, 2002), entre otros. Algunas de estas características pueden llegar a afectar el desempeño del motor, por lo cual existen ciertos límites para su porcentaje de blending y no es utilizado como un combustible independiente. Los límites varían según las políticas de cada país. En el caso de Colombia este límite es de 12% vol a partir del 5 de octubre del 2021 (MME, 2021).

Teniendo en consideración las limitaciones que tiene el biodiésel en cuanto al porcentaje de blending, existe otro tipo de biocombustible llamado diésel renovable que ha ganado relevancia debido a que presenta las mismas características (o incluso mejores) que el diésel convencional.

El diésel renovable es un hidrocarburo producido a través de varios procesos como se mencionó anteriormente, de hidrotratamiento, gasificación, pirólisis y otras tecnologías bioquímicas y termoquímicas (Rincón y Martínez, 2009). Este biocombustible cumple la especificación ASTM D975 para diésel fósil en Estados Unidos y la EN 590 en Europa y puede ser utilizado en blendings o como combustible independiente (stand-alone).

El diésel renovable puede ser producido a partir de varias fuentes de biomasa, como aceites vegetales, grasas animales y algas, entre otros. Diversos investigadores a lo largo de los años han explorado diferentes métodos para producir este tipo de biocombustible. Existen también diferentes configuraciones como plantas dedicadas o de co-procesamiento en las refinerías de petróleo. El método de hidrotratamiento es el mayormente usado en las refinerías y requiere la reacción de la materia prima (lípidos) con hidrógeno a temperaturas y presiones elevadas en presencia de un catalizador (Rincón y Martínez, 2009).

Algunos de los beneficios cuando se usa diésel renovable se relacionan con (Rincón y Martínez, 2009):

- Compatibilidad e infraestructura del motor: Los biocombustibles de hidrocarburos renovables son químicamente idénticos a sus contrapartes de petróleo, y, por tanto, minimizan los problemas de compatibilidad con la infraestructura y los motores existentes.

- Aumento en seguridad energética: Este tipo de biocombustibles pueden ser producidos domésticamente a partir de una gran variedad de materia prima y contribuir a la creación de empleos.

- Menos emisiones: El CO₂ capturado por materias primas en crecimiento reduce las emisiones totales de GEI mediante el balance del CO₂ liberado al quemar combustibles renovables en comparación con la quema de combustibles convencionales.

- Mayor flexibilidad: Los biocombustibles de hidrocarburos renovables como el diésel renovable son un reemplazo a los combustibles convencionales, permitiendo que exista un producto de varias materias primas y diferentes tecnologías de producción.

Ecopetrol con su política de disminuir el impacto ambiental, enmarcada en los acuerdos de París (European Commission, 2019), está realizando en sus refinerías de Barrancabermeja y Cartagena proyectos para la producción de combustibles renovables a partir de aceite de palma blanqueado. El BPO por sus iniciales en inglés, se obtiene a partir del aceite palma crudo, por medio de un proceso físico de adición de arcilla blanqueadora, agitación al vacío y filtración para la separación de compuestos colorantes (carotenoides en el caso del aceite de palma), fosfolípidos, jabones, metales pesados y descomposición de los productos de oxidación, tales como peróxidos (TANG).

ECODIESEL será la empresa encargada de suministrar 2000 BPD de BPO como materia prima para la U1100 en la Refinería de Barrancabermeja. El transporte de aceite de palma tanto crudo como refinado se hace actualmente a granel utilizando carrotanques para su distribución. A nivel industrial, la gran mayoría de los fluidos deben ser transportados por tuberías por temas de seguridad y eficiencia, por esta razón este proceso es de gran importancia y se cataloga como una

operación unitaria debido a que se deben aplicar conocimientos ingenieriles teóricos y prácticos para el diseño de las líneas de tubería que permitan y garanticen un suministro continuo de materia prima.

Para garantizar que el suministro de BPO llegue de manera continua a la U1100, se diseñó en este trabajo de investigación, un sistema de tubería para su transporte desde ECODIESEL hasta la planta de Parafinas, teniendo en cuenta los principios, ecuaciones y modelos matemáticos establecidos por la mecánica de fluidos, además de la seguridad e integridad de los procesos.

Las propiedades físicas del BPO como la densidad, que es utilizada para determinar dimensiones de equipos y caudales, ya que se relaciona la masa con su volumen, tiene como referencia 0,89 g/ml. Por otra parte, la viscosidad a 40°C es cercana a 39,95 cP, por lo cual puede requerir un sistema de bombeo poco robusto. Por último, a condiciones de temperatura ambiente el BPO presenta una fase sólida y líquida debido a su alto punto de fusión (34-40°C), lo que implica que se debe implementar un sistema de calentamiento durante su transporte y almacenamiento para mantenerlo en estado líquido (Rincón y Martínez, 2009).

2.1 Hidrotratamiento de BPO

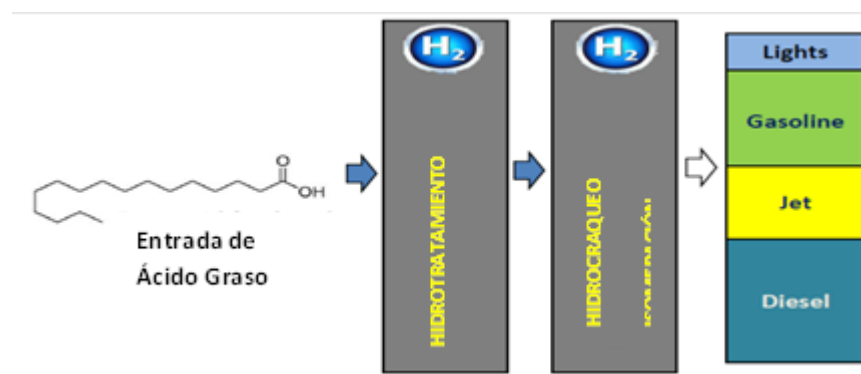
Los productos derivados del proceso de hidrotratamiento se conocen por varios nombres además de diésel renovable, entre los cuales está: *Hydrotreated Vegetable Oil (HVO)*, *Hydro-derived Renewable Diesel (HDRD)*, *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA)* -esto incluye otros combustibles que pueden obtenerse de ese procesamiento como el jet fuel- y diésel verde.

El hidrotratamiento es la primera parte de un proceso de dos fases para la producción de un rango de combustibles a partir de aceites y grasas. El hidrotratamiento utiliza hidrógeno para convertir compuestos insaturados como alquenos y aromáticos en alcanos saturados (parafinas) y cicloalcanos. La conversión suele realizarse en dos etapas, como se observa en la Figura 1.

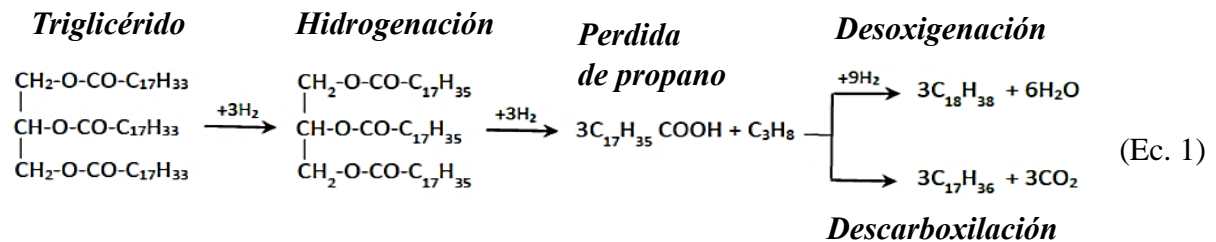
La primera etapa (hidrotratamiento) tiene lugar a una temperatura entre 300°C y 390°C. En primer lugar, el hidrógeno se agrega para saturar los dobles enlaces de los triglicéridos insaturados del aceite vegetal en un reactor catalítico. A medida que se agrega más hidrógeno se los dobles enlaces de los ácidos grasos de los triglicéridos del aceite vegetal se saturan. Finalmente, los ácidos grasos sufren un proceso llamado hidrodesoxigenación (el oxígeno se separa del H₂O por adición de más hidrógeno) o descarboxilación (el oxígeno se va como CO₂ sin adición de más hidrógeno) (ETIP, 2018). El resultado es una mezcla de hidrocarburos parafínicos de cadena recta, ramificada y cíclicos. Según se muestra en la Ecuación 1 (Ecuación de reacción del proceso de hidrotratamiento).

Figura 1.

Esquema simplificado de las dos etapas del hidropocesamiento (ETIP, 2018)



El gráfico representa un esquema simplificado de las etapas del hidroprocesamiento de los ácidos grasos del aceite de palma blanqueado.



Una de las ventajas del diésel renovable producido a partir del hidrotratamiento es que puede usarse una gran variedad de materias primas, incluyendo grasas, aceites vegetales, aceites pirolíticos, *tall oil* y otros compuestos no-comestibles. El hidrotratamiento de estos compuestos usa catalizadores especialmente diseñados y que son compatibles con el tipo de catalizadores utilizados en el hidrotratamiento de corrientes de diésel fósil, para cumplir especificaciones ambientales (Haldor, 2016). Debido a esto, un esquema de co-procesamiento con diésel fósil es posible y produce un diésel verde y limpio que cumple las especificaciones ASTM D975.

2.2 Tecnologías existentes

2.2.1 Ecofining

El proceso Ecofining desarrollado por varias empresas a nivel internacional para la producción de diésel verde es un proceso de hidrorefinado integrado en dos etapas, en donde, la materia prima se bombea a la presión del proceso, se mezcla con un hidrógeno reciclado y

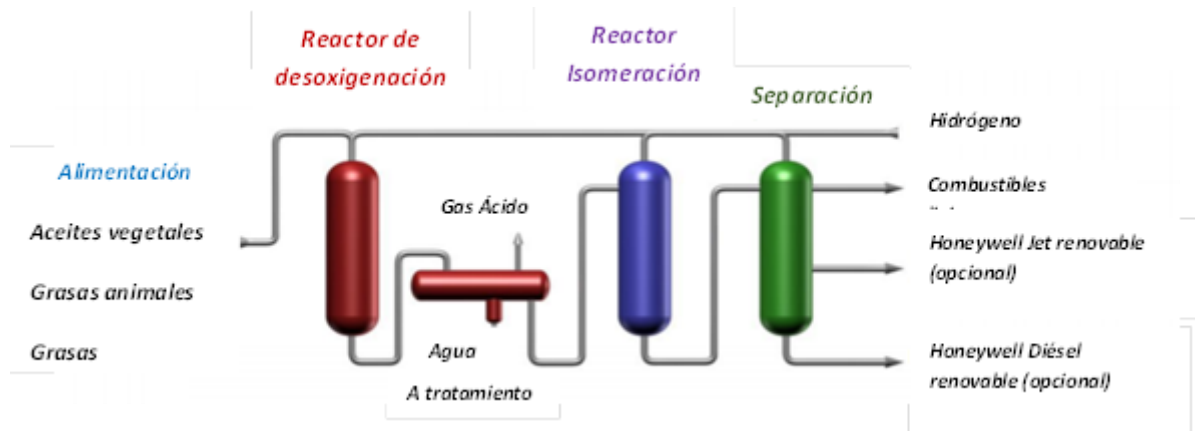
posteriormente se envía a un reactor de hidrogenación catalítica adiabático de múltiples etapas (R1), donde el aceite renovable se encuentra saturado y completamente desoxigenado. Los subproductos de la reacción son propano, agua y dióxido de carbono. El reciclaje de gas en el reactor tiene como objetivo lograr una presión parcial mínima de hidrógeno a la salida de este. En esta primera reacción, la conversión de la materia prima alimentada es completa y el rendimiento volumétrico de productos de hidrocarburos desoxigenados es superior al 100% (Kalnes. et. al, 2008).

El efluente del reactor se separa a la presión del reactor para eliminar los subproductos y los hidrocarburos de bajo peso molecular. El diésel resultante de la reacción se mezcla con el gas de hidrógeno adicional y posteriormente ingresa a un reactor de hidroisomerización catalítica integrado (R2), en donde las propiedades de flujo en frío se ajustan para cumplir especificaciones requeridas. La reacción que tiene lugar en el reactor se caracteriza por ser selectiva, por lo tanto, consume muy poco hidrógeno. El producto de esta reacción es un diésel ramificado rico en parafina, el cual se separa del exceso de hidrógeno en un separador gas/líquido convencional. El hidrógeno resultante se recicla de nuevo a R1 y al R2, para así mantener la presión parcial mínima requerida, sin embargo, se agrega hidrógeno de reposición al proceso para equilibrar el consumo de productos químicos, así como las pérdidas de solución (Kalnes. et. al,2008).

Finalmente, el producto líquido ingresa a una sección de recuperación, donde se emplean etapas de destilación convencionales para separar subproductos como propano y nafta. En caso de ser necesario, una parte del subproducto de combustible ligero se puede reformar con vapor para generar todo el hidrógeno consumido en el proceso (Kalnes. et. al,2008). El proceso anteriormente descrito se puede observar en la Figura 2.

Figura 2.

Esquema general del proceso Ecofining (TM) (Honeywell, 2019)



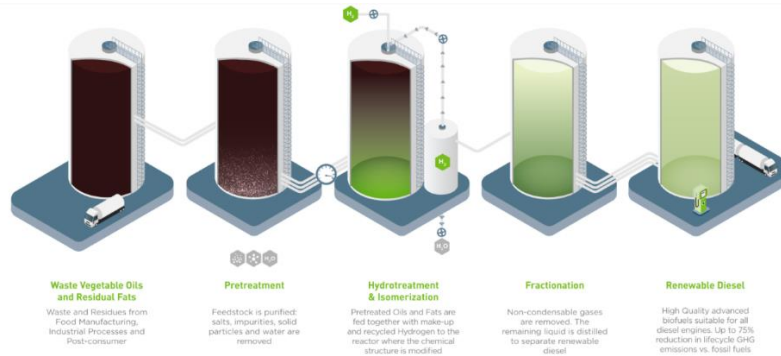
El gráfico representa un esquema general del proceso de Ecofining para obtener diésel renovable, Jet renovable y demás productos de cima durante la separación.

2.2.2 NextChem & Saola Energy

La tecnología combinada entre *NextChem* y *Saola Energy* consiste en un paso de hidrotratamiento seguido de un proceso de isomerización para producir combustible diésel renovable de alta calidad, gas combustible y nafta renovable, empleando como materias primas aceites y grasas residuales. El proceso tiene un enfoque modular y está concebido para capacidades tan bajas como 37, 5 millones de litros por año, lo cual corresponde a un valor aproximado de 30.000 toneladas. La integración de esta tecnología con refinerías o biorrefinerías permite optimizar la economía a través de la valorización de subproductos (NextChem, 2020).

Figura 3.

Proceso de producción de diésel renovable con tecnología NextChem (ETIP, 2018)



La figura muestra el proceso para obtener el diésel renovable a partir de aceites y grasas residuales.

2.2.3 NExBTL

El proceso *NExBTL* inicia con una unidad de pretratamiento diseñada para el procesamiento continuo de aceites y grasas vegetales. Este se basa en un proceso de blanqueo que inicia con la adición de un ácido, formando una sal, la cual es eliminada por precipitación. Seguidamente, la materia prima resultante se alimenta a través de sílice y/o tierra blanqueadora que actúa como adsorbente para una mayor reducción de impurezas (Neste Oil, 2016)

Posteriormente el proceso de hidrotreatment se divide en dos partes, en primer lugar, se desarrolla un proceso de hidrogenación (HDO) catalítica a través de reacciones consecutivas que forman tres parafinas de cadena lineal, además de subproductos como propano, agua y dióxido de carbono. La reacción tiene lugar poniendo en contacto los triglicéridos con hidrógeno sobre catalizadores a temperaturas y presiones elevadas. Estas reacciones son

exotérmicas y deben eliminar el exceso de calor producido, generalmente se emplea para calentar la alimentación entrante y con esto se reduce la necesidad de energía externa. Los gases producidos en esta etapa se alimentan a una sección de reciclaje, una vez el agua haya sido condensada para su reciclaje y reutilización. Después de la reacción de HDO, las parafinas se isomerizan con el fin de mejorar las propiedades en frío del combustible final. La reacción se desarrolla en una atmósfera de hidrógeno, y el consumo de hidrógeno se considera insignificante en esta etapa. El efluente de esta reacción son hidrocarburos líquidos que son alimentados a una columna de estabilización de diésel, donde los hidrocarburos ligeros se separan mediante arrastre con vapor de agua a baja presión (Neste Oil, 2016).

3. Metodología

3.1 Realizar el levantamiento del trazado de la tubería para el transporte del aceite de palma blanqueado desde ECODIESEL hasta la U1100

Se evaluaron tres diferentes rutas de transporte mediante la escala de *litker* con puntuaciones de 1 a 5. Para poder elegir la mejor alternativa, se evaluaron cinco variables según los criterios estipulados para diseño de tuberías que se reportan en el manual técnico de condiciones de diseño de la especialidad de procesos. Esta valoración se realizó en consenso con un equipo interdisciplinario integrado por ingeniería de procesos, ingeniero de equipo estático, ingeniero de equipo rotativo, ingeniero eléctrico y los dos autores. El resumen de los resultados obtenidos se muestra en las tablas 3 y 4.

3.2 Realizar los cálculos de ingeniería para el diseño y dimensionamiento del sistema de transporte del aceite de palma blanqueado

Se validaron las especificaciones técnicas de la materia prima y se desarrolló la evaluación de la mejor ruta de transporte y con ello, se realizó el estudio del sistema de transporte en el simulador *ASPEN HYSYS*® para determinar las condiciones de diseño de la tubería.

Las propiedades físicas de los componentes puros y los métodos de cálculo para las propiedades de las mezclas se encuentran en los paquetes termodinámicos o paquetes de fluido (fluid packages). La elección del paquete termodinámico adecuado depende del tipo de

componentes que existen en el fluido modelado y de las mezclas presentes, para este caso, se elige *NRTL*, debido a recomendación del programa.

Se seleccionó el equipo de bombeo, instrumentación asociada y sistema de calentamiento requeridos para el transporte del aceite de palma blanqueado a partir de los resultados obtenidos en el simulador, además se realizó un análisis de sensibilidad del sistema hidráulico para obtener las condiciones de operación.

3.3 Ejecutar el análisis económico de la implementación del sistema de transporte de BPO diseñado

Se realizó un análisis económico de la implementación de un sistema de transporte continuo por tubería de aceite de palma blanqueado desde ECODIESEL hacia la planta de parafinas teniendo en cuenta las diferentes alternativas de transporte planteadas. Se desarrolló un análisis del índice costo/beneficio entre el transporte continuo por tubería y el traslado por carrotanque.

4. Resultados

4.1 Variables de transporte a considerar para el aceite de palma blanqueado a través de todo el sistema

Para predecir el comportamiento del aceite de palma blanqueado bajo las condiciones de transporte es de suma importancia el conocimiento de las propiedades del fluido. Las principales propiedades del aceite de palma blanqueado se obtuvieron de los resultados de laboratorio suministrados por el ICP y se relacionan en la tabla 1.

Tabla 1.

Propiedades físicas del aceite de palma blanqueado BPO

Aceite de Palma Blanqueado	BPO	Unidades
Peso molecular	263,4	[kg/kmol]
Densidad	890,1	[kg/m ³]
Entalpía	2011,84	[kJ/kg]
Entropía	1,64	[kJ/kg-C]
Capacidad calorífica	1,95	[kJ/kg-C]
Exergía	-27,41	[kJ/kg]
Viscosidad cinemática	3,48	[cSt]
Calor de vaporización	265,26	[kJ/kg]
Tensión Superficial	25,88	[dyne/cm]
Conductividad Térmica	0,12	[W/m-K]
Punto de burbuja	0,18	[kPa]
Viscosidad	2,85	[cP]
Índice de viscosidad	16,42	

En la tabla 1 se observan las principales propiedades fisicoquímicas del BPO para tener en cuenta en el diseño del sistema de transporte por tubería.

En la tabla 2. Se observa el perfil de la destilación simulada del BPO y algunas características fisicoquímicas que fueron incluidas en el ambiente *properties* de *ASPEN HYSYS®* con el objetivo de obtener los pseudo-componentes requeridos para la simulación del sistema.

Tabla 2.

Calidad del aceite de palma Blanqueado BPO (Ecopetrol, 2022)

Aceite Blanqueado de Palma	Valor típico	Unidad	
Número de ácido total	6,16	%	
Acidez total expresada como ácido palmítico	3	%	
Nitrógeno	<50	ppm	
Contenido total de metales (ICP-OES)	<10	ppm	
P, Si, Ca, Mg, Fe, Na, As	<2	ppm	
IBP	338,9	°F	
	5	520,6	°F
	10	575,4	°F
	15	585,9	°F
	20	590,6	°F
	25	593	°F
	30	594,7	°F
	35	596,2	°F
	40	597,6	°F
	45	598,9	°F
	50	600,9	°F

Aceite Blanqueado de Palma	Valor típico	Unidad
55	603,1	°F
60	604,8	°F
65	606,2	°F
70	607,3	°F
75	608,3	°F
80	609,2	°F
85	610	°F
90	613,1	°F
95	614,7	°F
FBP	630,6	°F

4.2 Alternativas de trazado

El diseño del sistema de transporte para el BPO abordó el transporte desde el tanque de almacenamiento 120T-11C en ECODIESEL hacia el tanque de almacenamiento K0665 de la planta de parafinas para el suministro de carga al proceso de producción de diésel renovable. Para ello se estudiaron 3 alternativas de transporte del fluido por tuberías entre los puntos que se muestran en la Figura 4.

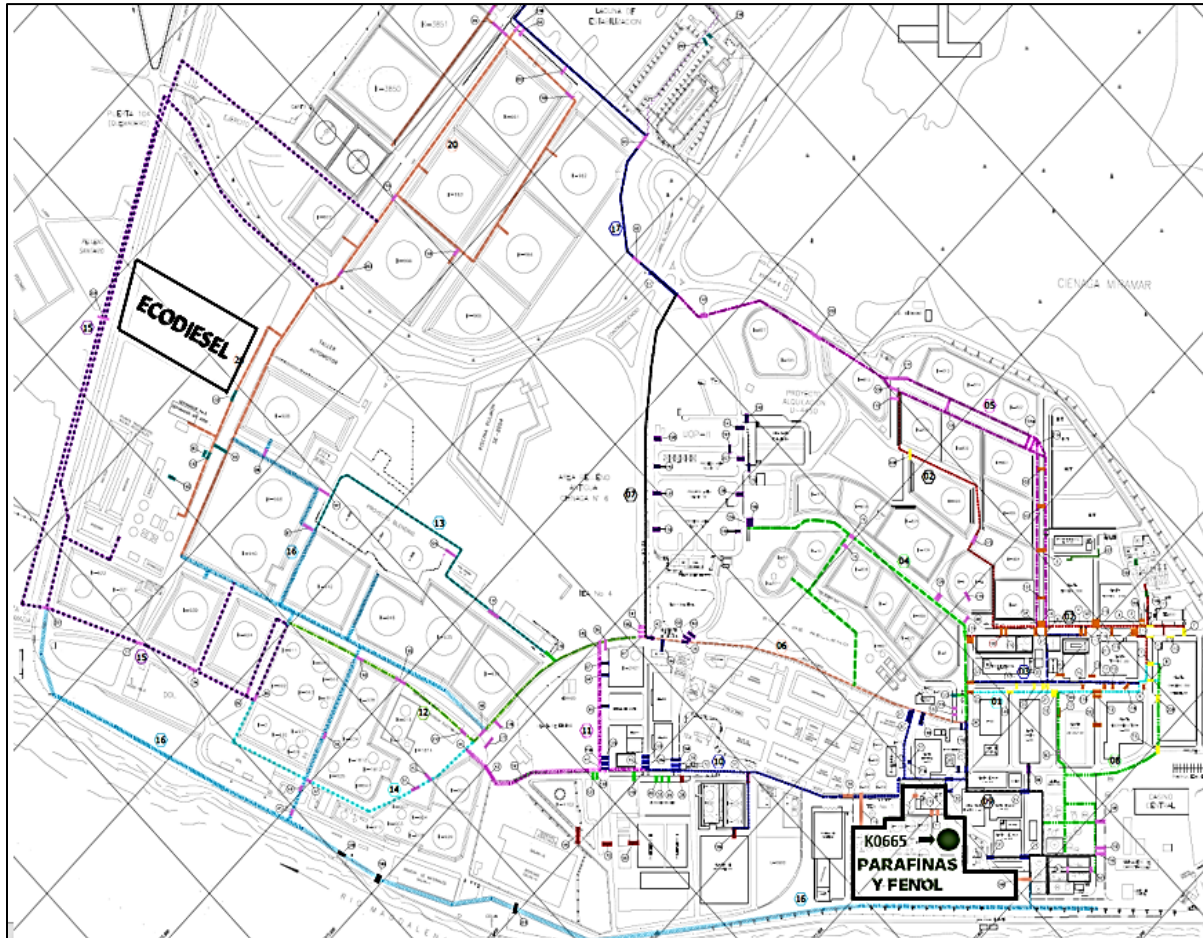
Para la evaluación de estas alternativas y la selección de la mejor opción se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El punto de inicio se definió en el tanque de almacenamiento 120T-11C en la planta de ECODIESEL ubicada en Barrancabermeja.
- El punto de finalización se definió en el tanque K0665 de la planta de parafinas de la GRB.

- La selección entre los trazados propuestos para la instalación de la tubería fue el de la distancia más corta entre el nodo de entrada y el nodo de salida de la línea de flujo.
- Costos asociados al sistema.
- La complejidad o facilidades de instalación, en la cual se evaluó condiciones del terreno, vías de acceso y soportería.
- Se eligió el tramo con más cercanía a las tuberías de servicios industriales, teniendo en cuenta que por las características fisicoquímicas del BPO, se requiere un *tracing* de vapor para mantener el flujo aún en condiciones.
- La posibilidad de Impacto medio ambiental que tendría la instalación del sistema de tubería planteado.

Figura 4.

Ubicación geográfica de las alternativas de estudio para el transporte de BPO hasta la planta de parafinas



La figura muestra la ubicación geográfica de ECODIESEL, la Planta de Parafinas y el tanque K0665 que recibe el BPO.

La alternativa 1, se planteó desde el tanque 120T-11C hasta la planta de parafinas con una longitud de 2,90 km y seccionada en 18 tramos que se interconectan en los bancos de tubería existente. La alternativa 2, se planteó desde el tanque 120T-11C hasta la planta de parafinas con

una longitud de 2,96 km y seccionada en 19 tramos. La alternativa 3, se planteó desde el tanque 120T-11C hasta la planta de parafinas con una longitud de 2,37 km y seccionada en 20 tramos.

Las tres alternativas de trazado se pueden ver en la sección B de los anexos.

La selección entre las alternativas planteadas se realizó teniendo en cuenta las variables anteriormente descritas y su peso relativo (con puntajes de 1 a 5), con el fin de poder evaluar cuantitativamente cada alternativa y escoger así la mejor opción. A continuación, se describe la metodología desarrollada:

- Longitud del tramo: Considerando mayor puntaje a la alternativa con menor longitud.
- Costos: Considerando un mayor puntaje para la alternativa de menor costo.
- Complejidad: A mayor complejidad, menor puntaje.
- Cercanía a servicios industriales: Considerando mayor puntaje a la alternativa más cercana a las líneas de vapor de servicios industriales.
- Impacto ambiental: mayor afectación al suelo, aire, cuerpos hídricos, menor puntaje.

A cada variable se le asignó un porcentaje de acuerdo con el grado de importancia dado para obtener un total del 100% al final como se puede observar en la tabla 3.

Tabla 3.

Calidad del aceite de palma Blanqueado BPO (Ecopetrol, 2022)

	Longitud [km]	Costos [\$]	Cercanía a servicios industriales	Complejidad	Ambiental
Alt. 1	4	4	3	3	5

	Longitud [km]	Costos [\$]	Cercanía a servicios	Complejidad	Ambiental
Alt. 2	3	3	3	3	5
Alt. 3	5	5	3	4	5
Peso %	25%	30%	10%	15%	20%

En la tabla 3 se definieron las variables importantes y su peso en cada alternativa de trazado de tubería.

En la tabla 4 se observa la calificación de cada criterio evaluado por cada alternativa y el puntaje ponderado total de cada una. Para obtener estos puntajes se multiplicó el peso asignado a cada variable por la puntuación dada en cada alternativa.

Tabla 4.

Calificación de cada criterio evaluado en la alternativa

	Longitud [km]	Costos [\$]	Cercanía a servicios industriales	Complejidad	Ambiental	Total
Alt. 1	1,2	1,2	0,3	0,45	1	4,15
Alt. 2	0,9	0,9	0,3	0,45	1	3,55
Alt. 3	1,5	1,5	0,3	0,6	1	4,9

En la tabla 4 se seleccionó la mejor alternativa de los 3 trazados de tubería propuestos. La mejor alternativa fue la alternativa 3 con total de 4,9. Esta alternativa cumple de mejor manera con los requerimientos preestablecidos y condiciones económicas del proyecto, por eso obtuvo el mayor puntaje.

Figura 5.

Ubicación geográfica de las alternativas de estudio para el transporte de BPO hasta la planta de parafinas



Una vez definida la alternativa 3 como mejor opción de trazado de tubería, esta se usó como base para el diseño del sistema de transporte de BPO, determinación del flujo requerido, longitudes, diámetros de tubería y accesorios, así como de necesidades del sistema de bombeo.

4.3 Alternativas de trazado

4.3.1 Viscosidad del BPO

La viscosidad es una de las propiedades más importantes de un fluido como el BPO y es determinante al momento de diseñar su sistema de transporte por tubería. La viscosidad del aceite es altamente sensible a los cambios de temperatura, es inversamente proporcional a la temperatura. Esta variable es uno de los parámetros principales de estudio cuando se evalúan los métodos de transporte siendo el objetivo principal la reducción de ésta para mejorar la fluidez del BPO en la tubería y asegurar la entrega y carga de esta materia prima.

4.3.2 Efecto de la temperatura en el diseño de transporte por tubería del BPO

Si el transporte de BPO se hace a temperatura ambiente, puede que esta temperatura sea menor a la temperatura del punto de fluidez 12°C. Por ello, se evalúa la temperatura necesaria para el transporte del BPO, la cual debe ser mayor al punto de fluidez, para garantizar el desplazamiento por la línea y además asegurar una mínima cantidad de energía en el sistema. Por lo anterior, es necesario el requerimiento de un sistema de calentamiento a lo largo de todo el trazado. Este es un método bastante usado para el transporte de sustancias viscosas, pues la aplicación de calor mejora el flujo de sustancias de alta viscosidad, reduciendo esta propiedad y aumentando la fluidez a medida que aumenta la temperatura.

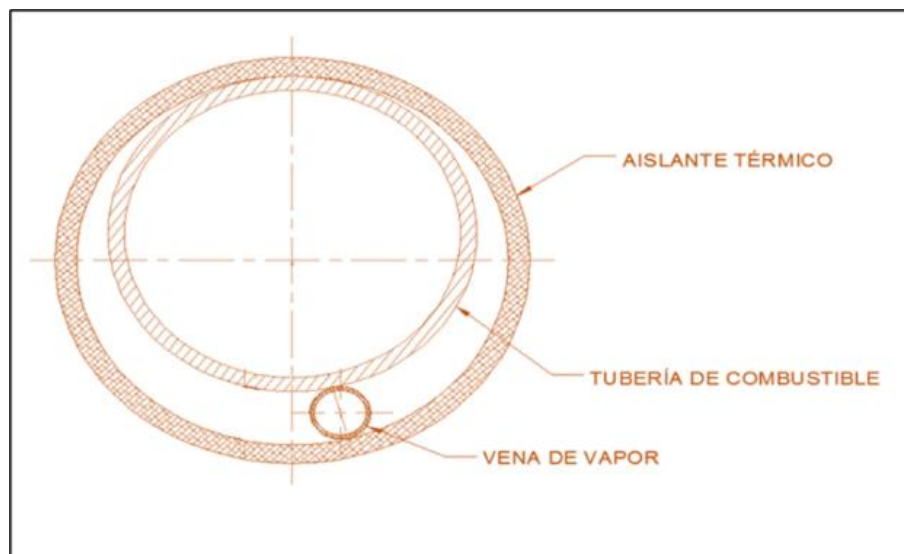
El calentamiento de las tuberías puede generar posibles cambios en las propiedades reológicas del BPO, por lo cual se debe tener muy presente debido a que un calentamiento

excesivo puede provocar expansión del producto en la tubería, generando daños en la misma si no se cuenta con un sistema de alivio y un calentamiento ineficiente incide en la capacidad del equipo de bombeo. La implementación de un sistema de calentamiento representa altos costos, pero si se cuenta con una facilidad de suministro de vapor existente permite la disminución de estos, sin embargo, se hace necesario realizar el monitoreo y mantenimiento debido al aumento de la tasa de corrosión de la tubería interna por efecto de la temperatura.

Se propone un sistema de *tracing* con vapor que consiste en una vena instalada a lo largo de la tubería principal que transporta el BPO y recubiertas con un sistema de aislamiento térmico. La vena de vapor se instala en la parte inferior de la línea con el objeto de favorecer una adecuada transferencia de calor por convección.

Figura 6.

Sistema de calentamiento mediante venas de vapor. (Vega, 2009)



En la figura 8, se puede observar un sistema de calentamiento típico para el transporte de un fluido viscoso utilizando venas de vapor.

Equipos de transferencia de calor propuestos para el sistema de traceado de vapor:

- Tubería principal de vapor: Esta se encarga de distribuir la totalidad del vapor de calentamiento y se instala paralelamente a la línea que transporta el BPO.

- Vena de vapor: Es una tubería de menor diámetro, encargada del calentamiento directo de las tuberías de transporte de BPO. Esta sale de la tubería principal de distribución de vapor (líneas de servicios industriales más cercanas) y se adhieren a lo largo de la línea. Las dimensiones (diámetro y paso) de esta tubería son el resultado del estudio de transferencia de calor realizado mediante la simulación del sistema en *ASPEN HYSYS*®.

- Tubería de condensado: Esta tubería se encarga de recolectar el condensado producto de la transferencia de calor al interior de la tubería principal de vapor y la vena de vapor.

- Trampas de vapor: Son accesorios instalados en la vena de vapor y en los pozos de goteo de la tubería principal de vapor.

- Aislamiento térmico: Recubrimiento exterior empleado para la conservación del calor en las tuberías.

4.3.3 Cálculo hidráulico a través del programa ASPEN HYSYS®

Se presentan los resultados de la simulación realizada con *ASPEN HYSYS*® versión 12.1. Este software especializado permitió realizar un modelo hidráulico para el transporte del BPO con calentamiento, disminuyendo los problemas por viscosidad. Se utilizaron los datos de la tabla 2 para ingresar las composiciones el aceite de palma Blanqueado BPO.

4.3.3.1 Dimensionamiento de la línea. Para el dimensionamiento de la línea de transporte de BPO se considera tanto la caída de presión como la velocidad del flujo. Para este diseño se considera el caso más representativo de operación.

Para el cálculo del diámetro de la tubería se emplea la siguiente ecuación:

$$D = \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot v}} \quad (\text{Ec.2})$$

Q: Caudal en m³/s

v: Velocidad del fluido en m/s

Teniendo en cuenta el valor de velocidad permitida para el diseño de tuberías de acero al carbono indicada en la Tabla 5, se toma como valor de referencia para este cálculo 1,288 m/s (6 pies/s). El caudal para transportar es 2000 BPD (0,003680 m³/s). Reemplazando los valores en la ecuación, el diámetro de la tubería calculado es 52,5mm (2 in).

Tabla 5.

Criterios de dimensionamiento de líneas para líquidos en general (Tecnología, 2010)

Servicio	Velocidad (ft/s)	ΔP (psi/100ft)
Todos	Mínima = 3	Presión disponible < 700 psig: 2 Presión disponible > 700 psig: 4
	Promedio = 4 a 6,5	
	Máxima = 15	

Servicio	Velocidad (ft/s)	ΔP (psi/100ft)
Agua otros servicios	3 a 15	0,5 a 2,0
Drenajes	1,5 a 4	0,2 máximo
Flujo por Gravedad	0,5 a 3,0	0,2 máximo

En la tabla 5, están definidos los valores de velocidad y caída de presión. Se utilizó un valor de 6 m/s para el cálculo del diámetro inicial de la tubería.

Con un diámetro de tubería de 2 in, las pérdidas de presión a lo largo de la tubería fueron muy grandes. En la simulación del sistema en *ASPEN HYSYS*®, este hizo convergencia en los cálculos hidráulicos con un diámetro de tubería de 4 in, debido a la viscosidad del BPO. Como resultado, se establece una tubería de acero de 4 in de diámetro para que el BPO pueda tener una mayor fluidez.

Las correlaciones utilizadas para el cálculo hidráulico en el programa *ASPEN HYSYS*® son *Beggs & Brill* y *Moody*; para los cálculos de caída de presión en las tuberías:

$$\Delta P = \frac{\rho * F * l * v^2}{144 * D * 2g} \quad (\text{Ec. 3})$$

Se considera un valor de rugosidad de 0,0000457m (0,0018 in), (ver tabla anexos, propiedades de los fluidos, rugosidad relativa tabla A2), para una tubería de acero al carbono nueva. Este material es el elegido para el diseño del ducto.

4.4 Modelado del sistema en ASPEN HYSYS®

Para esta simulación se delimitó el sistema desde el tanque 120T-11C en ECODIESEL hasta el tanque K0665 en la planta de Parafinas. El objeto de estudio es un sistema de transporte BPO por tubería.

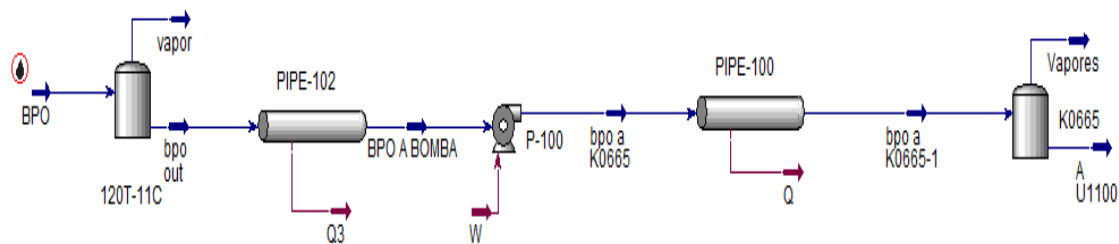
Los requerimientos que se utilizaron para el desarrollo de la simulación en condiciones actuales fueron:

- Destilación simulada del BPO y características fisicoquímicas.
- Capacidad de almacenamiento del tanque 120T-11C, diámetro y altura.
- Capacidad de almacenamiento del K0665, diámetro y altura.
- Temperatura de operación del BPO.
- Carga a transportar 2000 bpd.
- Trazado de tubería seleccionado, para nuestro caso la alternativa 3.

Para este trabajo, se utilizó el software ASPEN HYSYS® V12.1. La identificación del modelo termodinámico adecuado en el desarrollo de la simulación se dispuso de acuerdo con los valores de las propiedades fisicoquímicas y termodinámicas del BPO. (Perales, 2010).

Figura 7.

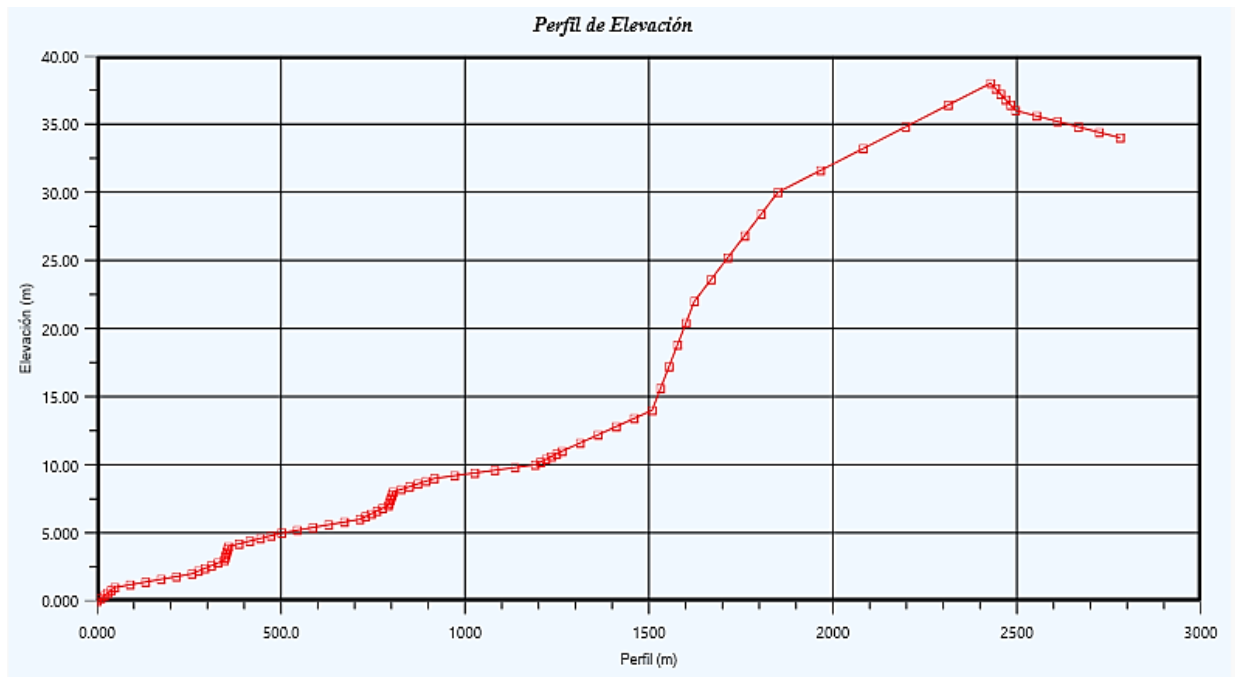
Esquema del Modelo en el simulador



En la figura 7, se muestra el diagrama de flujo del proceso para el transporte de BPO iniciando en el tanque 120T-11C hasta el tanque K0665.

Figura 8.

Perfil de elevación de la línea



En la figura 8, se observan los perfiles de elevación del trazado de tubería seleccionado para el transporte del BPO.

Figura 9.

Comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura

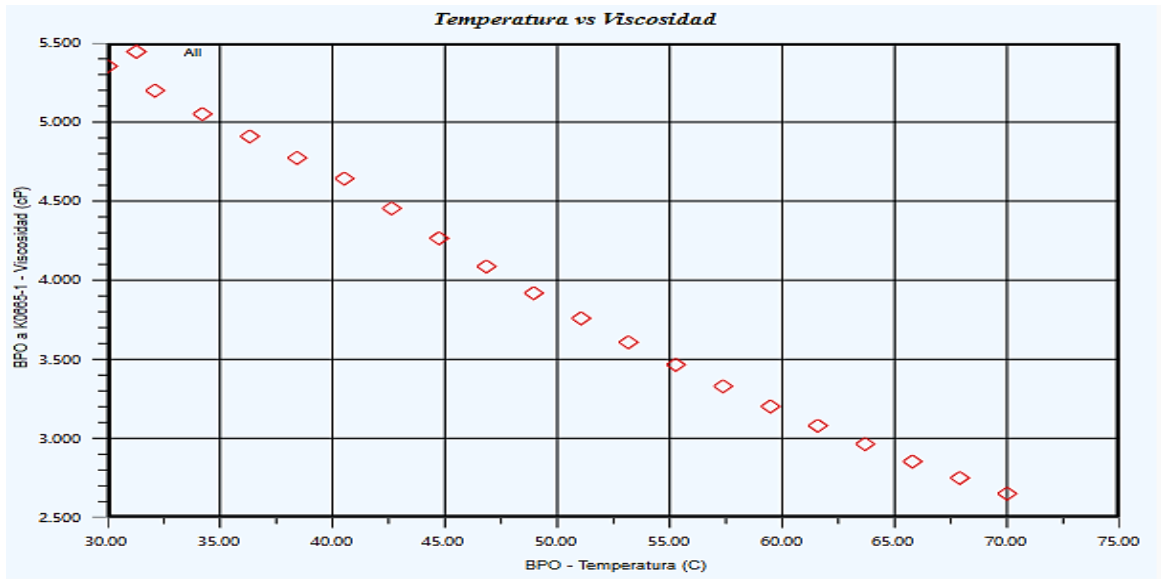
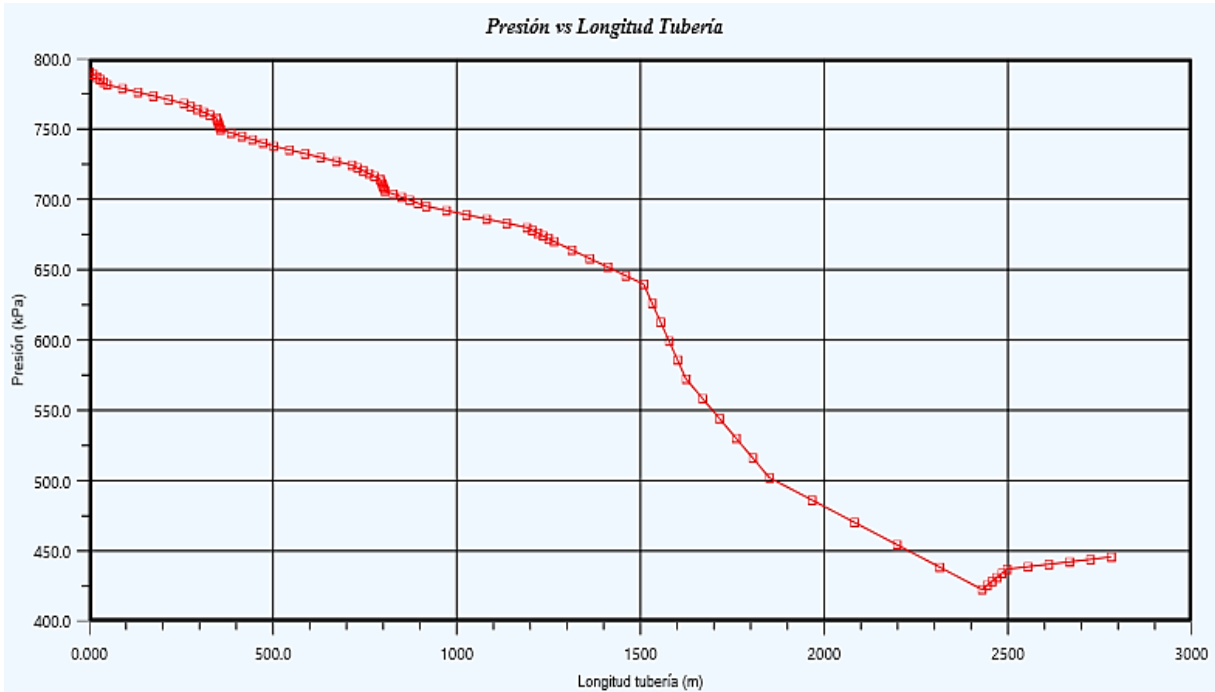


Figura 9, se muestra el comportamiento de la viscosidad con los cambios de temperatura que se producen a lo largo de la tubería. Se puede observar una reducción bastante significativa con respecto al valor de viscosidad inicial, lo que indica una mejor fluidez del BPO.

Figura 10.

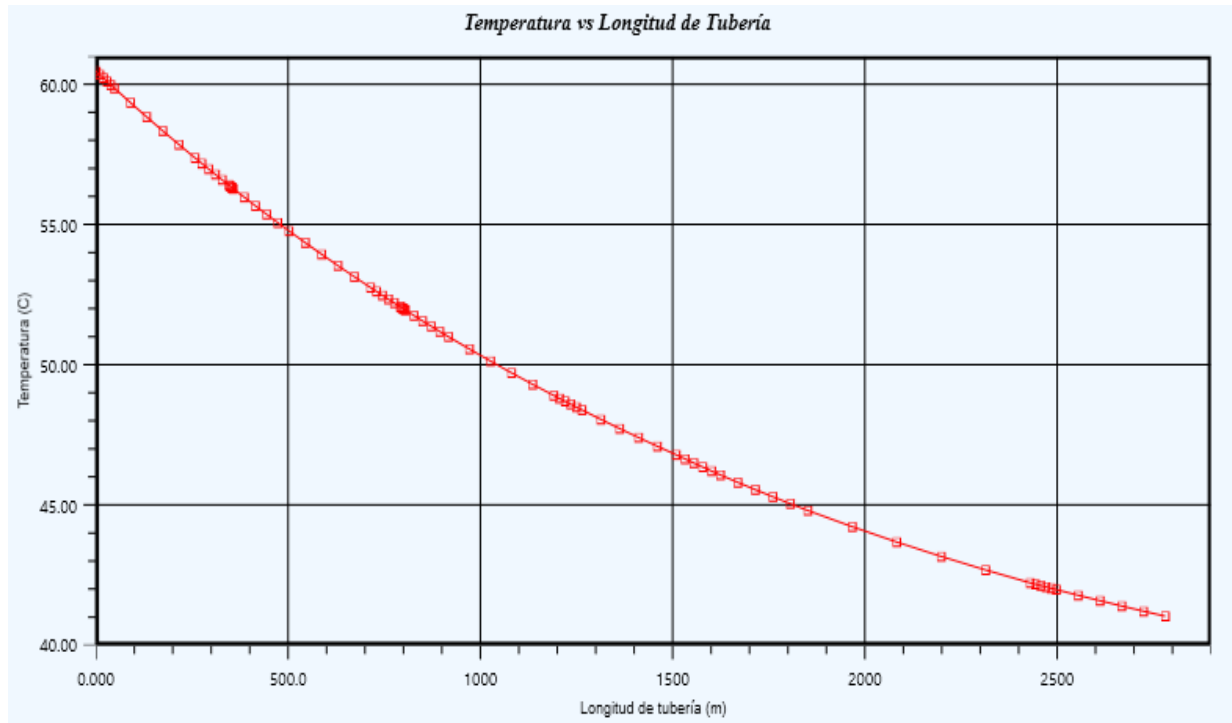
Perfil de presiones en función de la longitud de tubería



En la figura 10, se observa una caída de presión en la tubería de aproximadamente 151,4 kPa (21,95 psi). Se puede observar que el cambio en la presión en cada uno de los tramos a lo largo de toda la tubería se comporta de manera lineal, esto se debe a que los valores de densidad y pérdidas por fricción permanecen constantes a lo largo de toda la tubería. Las variaciones, son debidas a las inclinaciones que toma cada uno de los tramos simulados de la línea.

Figura 11.

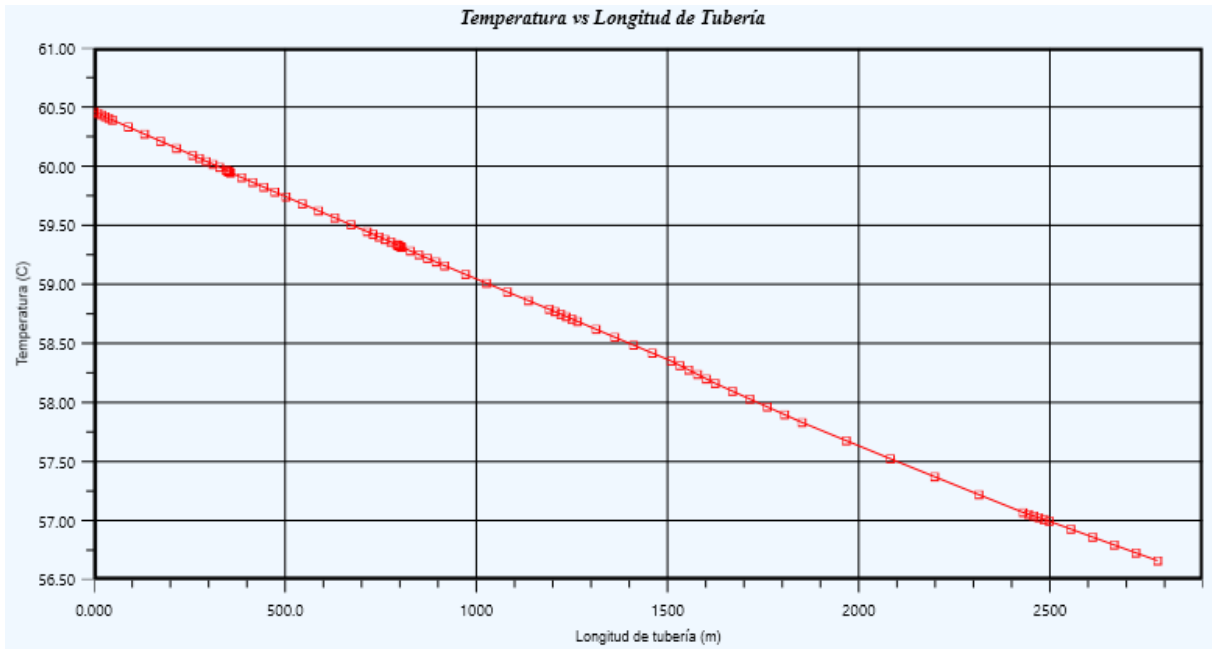
Perfil de temperatura en función de la longitud de la tubería sin revestimiento y tracing



En la figura 11, vemos la pérdida de energía en forma de calor a través de toda la tubería.

Figura 12.

Perfil de temperatura en función de la longitud de tubería con aislamiento térmico



En la figura 12, se observa una pérdida de 3,40°C en el perfil de temperatura de la tubería cuando tiene un sistema de tracing con vapor y aislamiento térmico que mantiene la temperatura por encima del punto de fusión del BPO y minimiza las pérdidas de calor al medio ambiente, con esto logramos mantener las condiciones de viscosidad el BPO, evitando un mayor consumo de potencia en la bomba.

El revestimiento usado como material aislante tendrá un espesor de 0,40 in y será *pyrogel*, el cual tiene muy baja conductividad térmica.

Tabla 6.

Datos hidráulicos del sistema de bombeo calculados con ASPEN HYSYS®.

VARIABLES	VALORES
Presión de descarga	790,8 kPa (114,7 psia)
Diff. head	77,81 m (255,3 ft)
NPSH	1,018 m (3,34 ft)
BHP	3,97 kW (5,33 hp)
Potencia del Motor	4,7 kW (6,3 hp)

En la tabla 6, se puede observar el cálculo que realiza el software ASPEN HYSYS® de la potencia de la bomba a instalar en el punto inicial y las condiciones hidráulicas para tener en cuenta en la selección de equipos. Se estimaron los porcentajes de error con los cuales estimamos la confiabilidad de los datos obtenidos en el simulador.

El porcentaje de error se mide con el valor calculado del NPSH con las dimensiones del tanque 120T-11C (Diámetro: 6,87 m y Altura: 10,31 m) versus el valor arrojado por el programa.

$$\%error = \left| \frac{3,34 - 3,25}{3,25} \right| * 100 = 2,76\%$$

El error es de 2,76 %, lo cual asegura que se tomen buenas decisiones respecto a la elección de equipo de bombeo y accesorios en el sistema de transporte de BPO.

4.5 Selección de equipos y accesorios del sistema

Para el diseño del sistema de transporte se realizó la elección de tuberías, bombas, accesorios, tanques de almacenamiento, entre otros, como resultado de un análisis crítico y de una consulta bibliográfica de lo que involucra el diseño del sistema de transporte de un fluido viscoso. Para la aplicación de los cálculos de ingeniería que involucran el sistema de transporte de fluido, se consideró el caudal máximo de la bomba seleccionada. Esto permitió no partir de la subjetividad. De esta manera se calculó la potencia teórica consumida y se comparó con la simulada, trabajando a su capacidad máxima en los diferentes fluidos involucrados.

Potencia teórica consumida por la bomba BHP: 5,57 hp

$$\%error = \left| \frac{5,33 - 5,57}{5,57} \right| * 100 = 4,3\%$$

Los datos de HYSS tienen una alta confiabilidad permitiendo seleccionar los equipos adecuados con base en los resultados obtenidos de la simulación.

Tabla 7.*Equipos y tuberías necesarios para el diseño del sistema de transporte*

Descripción	Especificaciones	Capacidad	Dimensiones	Función en el sistema de transporte
Tanque de almacenamiento	Acero al carbono con serpentín	2402 bls	Diámetro 6,87 m Altura 10,31 m	Almacenar el BPO
120T-11C				
K0665		8000 bls	Diámetro 12,29 m Altura 12,79 m	
Bomba Centrifuga	Marca: Netzsc Modelo: Sulzer Pumps	13,25 m ³ /h		Transformar la energía mecánica en energía hidráulica.
Codos	Acero al carbono	-	4 in x 40 x 90°	Cambiar la dirección del flujo
Válvula de compuerta	Acero al carbono	-	1 x 4 in	Detener, iniciar o regular la circulación de los fluidos
Tubería	Acero al carbono		4 in longitud: 2,37 km	Transportar el fluido de un punto a otro

En la tabla 7, se muestra el listado de equipos requeridos para la implementación del sistema de transporte por tubería de BPO

4.6 Costo de implementación del sistema de transporte diseñado

Para la determinación del costo de implementación del sistema de transporte diseñado, se consideraron las cotizaciones ofertadas a Ecopetrol. Los precios de los equipos, implementos y accesorios del sistema se encuentran detallados en la Tabla 8.

Tabla 8.

Costo de implementación del sistema de transporte diseñado

Descripción	Especificaciones	Cantidad	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
Tanque de almacenamiento*	Acero al carbono con serpentín	2	-	-
Bomba Centrifuga	Marca: Netzsc Modelo: Sulzer Pumps	1	100 000 000	100 000 000
Codos	Acero al carbono	40	40 556	1 622 240
Válvula de compuerta 4 x150	Acero al carbono	1	1 125 000	1 125 000
Tubería 4"	Acero al carbono S-40 A-106	250	127 579	31 894 750
Aislamiento térmico: Trazado, prefabricado instalación y foil en aluminio	Pyrogel Foil en aluminio	2,37 km	175 000	414 750 000
Tracing de calentamiento: Trazado, prefabricado, instalación y accesorios		2,37 km		160 107 600

Descripción	Especificaciones	Cantidad	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
Montaje tubería de 4"				400 000 000
Montaje bomba norma API 686			300 000 000	300 000 000
Total				1 409 499 590

Los tanques de almacenamiento están disponibles en ECODIESEL y en la planta de Parafinas.

En la tabla 9, podemos ver el costo que representa el transporte de BPO por carrotanques como actualmente se abastece la planta de ECODIESEL. El valor se obtuvo por información suministrada por personal de compras de insumos de materiales y personal del área de ventas, quienes consultaron a las diferentes empresas el costo de llevar BPO desde ECODIESEL a la planta de Parafinas. Se aclara, que en este presupuesto no se incluye el montaje de descargaderos, teniendo en cuenta que, tanto en la fuente como en el destino, existen facilidades para realizar estos movimientos de cargue y descargue.

Para transportar 2000 bpd de BPO, se requieren 10 carrotanques aproximadamente, con capacidad de 30 toneladas cada uno.

Tabla 9.

Costos de transporte por carrotanques

Descripción	Carrotanques requeridos	Valor unitario	Valor Total
Costo flete de carrotanque por viaje	10	1 000 000	10 000 000

Descripción	Carrotanques requeridos	Valor unitario	Valor Total
(cargue y descargue)			
Costo por mes			300 000 000
Costo total por año			3 600 000 000

El costo de la implementación del sistema de transporte por tubería es menor en aproximadamente un 60 % solo para el primer año. Adicional a la estimación económica por concepto de materiales y equipos, se debe considerar el costo asociado a la logística durante el cargue y descargue en ambas unidades, lo cual no se consideró en esta evaluación.

5. Conclusiones

Se evaluaron 3 alternativas de trazados y se encontró que, bajo los criterios establecidos para su selección, la mejor ruta de transporte fue la opción 3, ya que representa menores costos pues es el trayecto más corto entre las dos áreas, así como una menor complejidad para su montaje, lo que aumentó su valoración mediante la escala de *Litker*.

Se estableció un diseño de transporte del BPO, incluyendo línea de proceso, tanques con la capacidad de procesamiento requerida, bomba, sistema de calentamiento y accesorios. El simulador *ASPEN HYSYS*® permitió calcular los requerimientos como el diámetro de la tubería, especificaciones del sistema de bombeo y caída de presión, los cuales fueron validados con ingeniería de procesos, permitiendo una estimación de error aceptable.

Al realizar el análisis del trazado de tubería, los costos del sistema propuesto equivalen al 39,15% de los costos del sistema tradicional de transporte por carrotanque, por lo que se considera viable su implementación.

6. Recomendaciones

Evaluar características del BPO a diferentes temperaturas, para observar su comportamiento y de esta manera determinar si es necesario el uso del tracing de calentamiento con vapor.

Al analizar los resultados arrojados por el simulador ASPEN HYSYS®, se observa que el equipo de bombeo existente en la planta de ECODIESEL, puede ser usado en el sistema propuesto, pues cumple con las especificaciones requeridas para transportar el BPO hasta el K0665. Se recomienda realizar valoración por ingeniería de equipo rotativo para verificar su estado. De esta manera nos ahorraríamos los costos elevados por compra y montaje del conjunto bomba – motor.

Teniendo en cuenta que el BPO presenta expansión térmica a una temperatura mayor a los 70 °C, se debe instalar un sistema de alivio que permita regular la energía del sistema a través de una válvula de seguridad (RV), un controlador de presión (PIC) o documentar en un procedimiento, la necesidad de dejar alineada la válvula de recibo en el K0665.

Referencias Bibliográficas

- Bannon. «Transport & Environment, France's National Assembly ends tax incentives for palm oil in diesel fuel, » Diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.transportenvironment.org/press/france%E2%80%99s-national-assembly-ends-tax-incentives-palm-oil-diesel-fuel>.
- Ceriani, Roberta.; Paiva, Fernanda.; Goncalves, Cintia.; Batista, Eduardo.; Meirelles, Antonio. 2008. Densities and Viscosities of Vegetable Oils of Nutritional Value. J. Chem. Eng. Data 53 (8): 1846-1853.
- Ecopetrol. (13 de febrero de 2014) Manual técnico de criterios de diseño de la especialidad de ingeniería de procesos.
- Engineering Data Book.12ª Edición. Tulsa Oklahoma. Gas Processors Suppliers Association. 2004.
- Environmental and Energy Study Institute, «Alternative Low / No Carbon Fuels, » Environmental and Energy Study Institute, [En línea]. Available: <https://www.eesi.org/topics/alternative-fuels/description>. [Último acceso: abril 2021].
- EPA, «EPA420-F00-032 Biofuels,» Estados Unidos, 2002.
- ETIP Bioenergy, «Hydrotreatment to HVO» 2018.
- European Commission. (2019). Climate Action, Paris Agreement. (European Commission) Recuperado el febrero de 2021, de https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en.
- Firestone, David. 2006. Physical and Chemical Characteristics of Oils, Fats, and Waxes, 2nd edition, AOCS Press (Estados Unidos).

Flach, Bob., Lieberz Sabine., y Bolla, Sophie. «Biofuels Annual, » United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service, The Hague, 2021.

Foster, Scott. y Elzinga, David. «El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible,» Crónica ONU.

García, C. (2016). El plan de París. Así actúa Colombia frente al cambio climático. Bogotá: Fundación Natura, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, WWF-Colombia. Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/colombia_hacia_la_COP21/el_acuerdo_de_paris_frente_a_cambio_climatico.pdf

Haldor, T. «Future fuel - the challenges associated with renewable diesel hydrotreating,» *Digital Refining - Processing, Operations & Maintenance*, USA, Mayo 2016.

Honeywell UOP, *Refinery Coprocessing Options for Advanced Biofuels*, New Delhi, 2019.

Kalnes Tom, Terry Marker. «Green diesel production by hydrorefining renewable feedstocks,» *Biofuels Technol*, vol. 4, 2008.

Ken Arnold, Maurice Stewart. Surface Production Operations. Design of Oil Handling Systems and Facilities. Segunda Edición. Houston, TX. Gulf Publishing Company. 1999. Volume 1.

Kotrba, Ron. «The Complex Dynamic of Coprocessing, » *Biodiesel Magazine*, 24 Octubre 2018.

Lieberz, S. «Biofuels Mandates in the EU by Member State and United Kingdom - 2021, » United States Department of Agriculture - Foreign Agricultural Service, 2021.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Ministerio de Minas y Energía y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Ministerio de Minas y Energía,» 2021. [En línea]. Available:

https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24274862/030321_180321_Resolucion_AjusteMezclasBios_2021_vpub.pdf/74f98c56-6ba7-4072-abf1-4f4f4e85f1fd.

NextChem, «Renewable Diesel: Fuel for thought. Fuel for business.,» s.f., 2020.

Ramirez, Oscar Eduardo. Evaluación de parámetros de diseño y operacionales en el transporte de hidrocarburos líquidos a través de oleoductos bajo tierra. Trabajo de Monografía Especialista en Producción de Hidrocarburos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2011. 88 p.

Rincón, Sandra. y Martínez, Daniel. (Julio de 2009). Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. Obtenido de https://www.academia.edu/39748536/An%C3%A1lisis_de_las_propiedades_del_aceite_de_palma_en_el_desarrollo_de_su_industria

Shames, Irving H. Mecánica de Fluidos. Tercera Edición. Santafé de Bogotá. McGraw Hill. 1995, 829 p.

Sims, R. 1955. Empirical Viscosity Relations of Heated Vegetable Oils. Ind. Eng. Chem 47(5): 1049-1052.

Scott, F., & Eizinga, D. (s.f.). El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible. Crónica ONU.

Tang, Wel. (s.f.). publicaciones.fedepalma.org. Obtenido de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/555/555/#:~:text=en%20la%20refinaci%C3%B3n%20del%20aceite,aceite%20por%20medio%20de%20filtraci%C3%B3n>.

Technical Data Book – Petroleum Refining. Sexta edición. American Petroleum Institute.

Washington, D.C., 1997.

United Nations Climate Change. (s.f.). Key aspects of the Paris Agreement. Paris: United Nations Climate Change.2020.

Vega, Luis Enrique. Alternativa Metodológica para el Cálculo Térmico de Oleoductos. En Revista Holguín. Año XV, julio-septiembre, 2009. 10 p.

Yaser Dahman, Cherilyn Dignan, Asma Fiayaz, Ahmad Chaudhry «An introduction to biofuels, foods, livestock and the environment, » de Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2019, pp. 241-276.

Zaliha, Omar.; Chong, Chiew.; Cheow, S.; Norizzah, A.; Kellens, M. 2004. Crystallization Properties of Palm Oil by Dry Fractionation. Food Chemistry 86: 245-25

Apéndice

Apéndice A. Propiedades físicas de los fluidos

Pérdidas de presión en tuberías

Durante el transporte del fluido de un punto a otro a lo largo de toda la tubería, se presentan caídas de presión permitidos y las cuales están restringidas según el proceso. Para determinar las caídas de presión en las líneas de tubería, se debe evaluar el tipo de fluido a ser transportado y las características de la tubería. En este caso, se tiene muy en cuenta para el vapor de calentamiento de la tubería.

Número de Reynolds (Re)

El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y diámetro del tubo a través del cual fluirá el flujo, en una expresión adimensional. Para tuberías circulares, en flujo a tubería llena, se tienen la siguiente expresión:

$$Re = \frac{V \cdot D \cdot \rho}{\mu} \quad (\text{Ec. 1})$$

El número de Reynolds, Re, determina el tipo de flujo en la tubería. A continuación, se identifica el tipo de fluido dependiendo del número de Reynolds.

Tabla A1.*Clasificación de flujo según número de Reynolds vs régimen de flujo*

Menor a 2300	Laminar
Entre 2300 - 4000	Crítico
Mayor que 4000	Turbulento

Nota: MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos. Sexta edición. México (Pearson. 2006)

Fórmula de Darcy – Weisbach

El flujo de fluidos en tuberías está siempre acompañado del rozamiento de partículas del fluido entre sí, lo que representa pérdida de energía disponible. La ecuación general de la pérdida de presión en las tuberías y conductos, conocida como la fórmula de Darcy– Weisbach es la siguiente:

$$h_L = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{D \cdot 2g} \quad (\text{Ec. 2})$$

El flujo de fluidos en tuberías está siempre acompañado del rozamiento de partículas del fluido entre sí, lo que representa pérdida de energía disponible. La ecuación general de la pérdida de presión en las tuberías y conductos, conocida como la fórmula de Darcy– Weisbach es la siguiente:

$$h_L = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{D \cdot 2g} \quad (\text{Ec. 3})$$

En términos de la caída de presión puede escribirse de la siguiente manera:

$$P_1 - P_2 = \Delta P = \frac{\rho * f * L * v^2}{144 * D * 2g} \quad (\text{Ec. 4})$$

La fórmula de Darcy– Weisbach es válida tanto para flujo laminar como turbulento, de cualquier líquido en una tubería. Para que la fórmula de Darcy sea válida, se deben presentar las siguientes condiciones:

- Continuidad o estado estable: La velocidad del fluido no debe cambiar, deberá permanecer constante.
- Incompresibilidad: No existe cambio de volumen debido a un cambio en la presión
- Isotérmico: El fluido mantendrá un valor de temperatura constante.
- Longitud de tubería: La longitud de la tubería será superior a 10 veces el diámetro de la tubería en la cual es transportado el fluido.
- Diámetro interno uniforme: El diámetro interno de la tubería constante.

Coefficiente de Fricción.

El factor o coeficiente de fricción, f , se define como la relación entre el esfuerzo de corte en la interfase fluido-sólido y la energía cinética del fluido por unidad de volumen. El factor de fricción se utiliza para calcular la caída de presión debido a la fricción. Para régimen laminar en todas las tuberías y para cualquier fluido, en donde el valor del Reynolds es inferior a 2.000, la correlación para el factor de fricción viene dado por la siguiente ecuación (Castañeda, 2016):

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{Ec. 5})$$

Si el flujo es turbulento en una tubería rugosa, se emplea la ecuación de Nikuradse (1933):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{371 * D} \right) \quad (\text{Ec. 6})$$

Colebrook-White (1939) desarrolló una fórmula que agrupa las dos expresiones anteriores y tiene validez para todo tipo de flujos y rugosidades.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\left(\frac{\varepsilon}{371 * D} \right) + \left(\frac{2,51}{Re * \sqrt{f}} \right) \right] \quad (\text{Ec. 7})$$

El Diagrama de Moody (1944), publicado por *ASME (American Society of Mechanical Engineers)*, es la representación (en escala logarítmica) de la expresión de Colebrook-White y permite calcular el coeficiente de fricción, f , en función del número de Reynolds (Re) y la rugosidad relativa ε/D .

La utilización de este diagrama permite:

- Determinar el valor del factor de fricción, f , para ser utilizado en la ecuación de Darcy.
- Resolver todos los problemas de pérdidas de carga primarias en tuberías de cualquier diámetro, cualquier material, y para cualquier caudal.

Rugosidad relativa.

Es la relación entre la rugosidad absoluta de la pared interna de la tubería sobre el diámetro interno de la tubería. La rugosidad absoluta es la altura promedio de las imperfecciones en la superficie de la pared de la tubería. El valor de la rugosidad varía con el material y con el tiempo de instalación de la tubería. En la tabla 6, se muestran valores de rugosidad en tuberías para diferentes tipos de tuberías.

Tabla A2.

Rugosidad de Tuberías

TIPO DE TUBERIA	RUGOSIDAD		
	ft	in	mm
(Limpia y nueva)			
Acero al carbono (<i>Carbon Steel</i>)	0.00015	0.0018	0.046
Hierro fundido (<i>Cast iron</i>)	0.00085	0.01	0.26
Tubería Estirada (<i>Draw tubing</i>)	0.000005	0.00006	0.0015
Hierro Galvanizado (<i>Galvanized iron</i>)	0.0005	0.006	0.15
Concreto (<i>Unlined Concrete</i>)	0.001- 0.01	0.12 - 0.12	0.3-3.0

Nota: SHAMES, Irving H. Mecánica de Fluidos. Tercera Edición. Santafé de Bogotá. McGraw Hill. 1995, 829

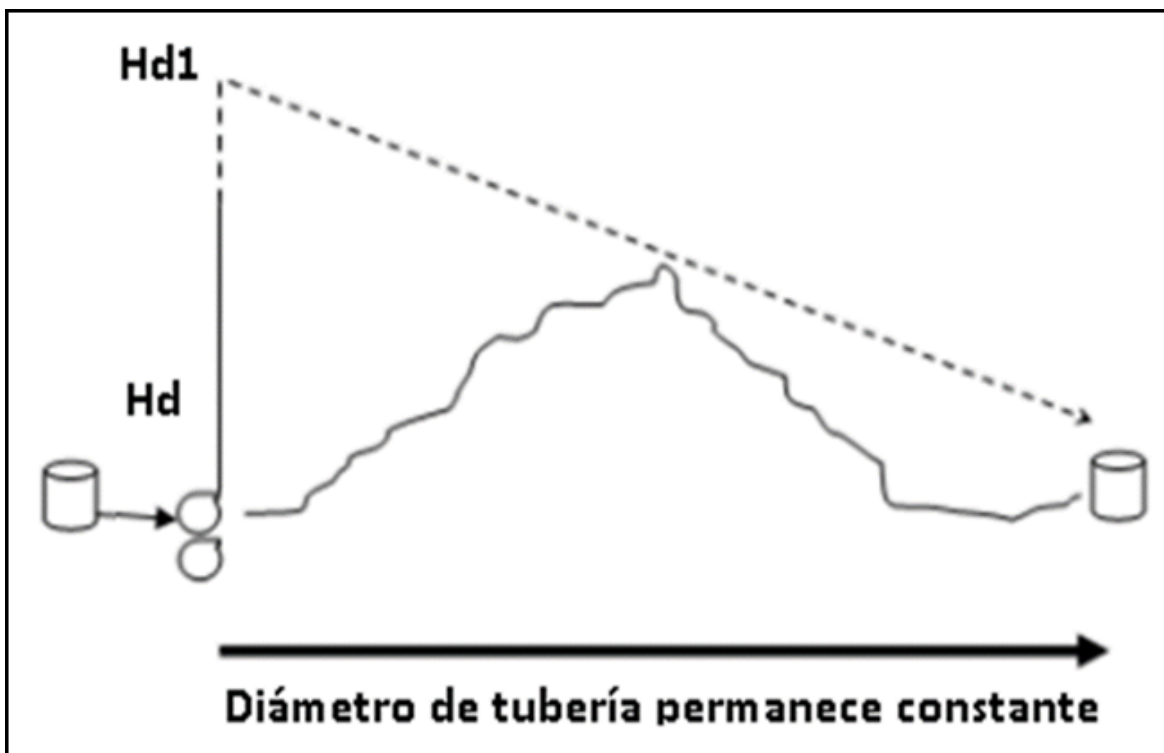
Gradiente Hidráulico

El gradiente hidráulico refleja los cambios de cabeza en los diferentes puntos de la línea. La presión de descarga del sistema se va cayendo, debido al movimiento del fluido a través del

ducto. El gradiente hidráulico debe calcularse teniendo en cuenta el perfil topográfico del terreno y la línea calculada para el gradiente.

Figura A1.

Gradiente Hidráulico (Mejía, 1986)



Apéndice B. Alternativas de trazados propuestos

Figura B1. Trazado tubería 1

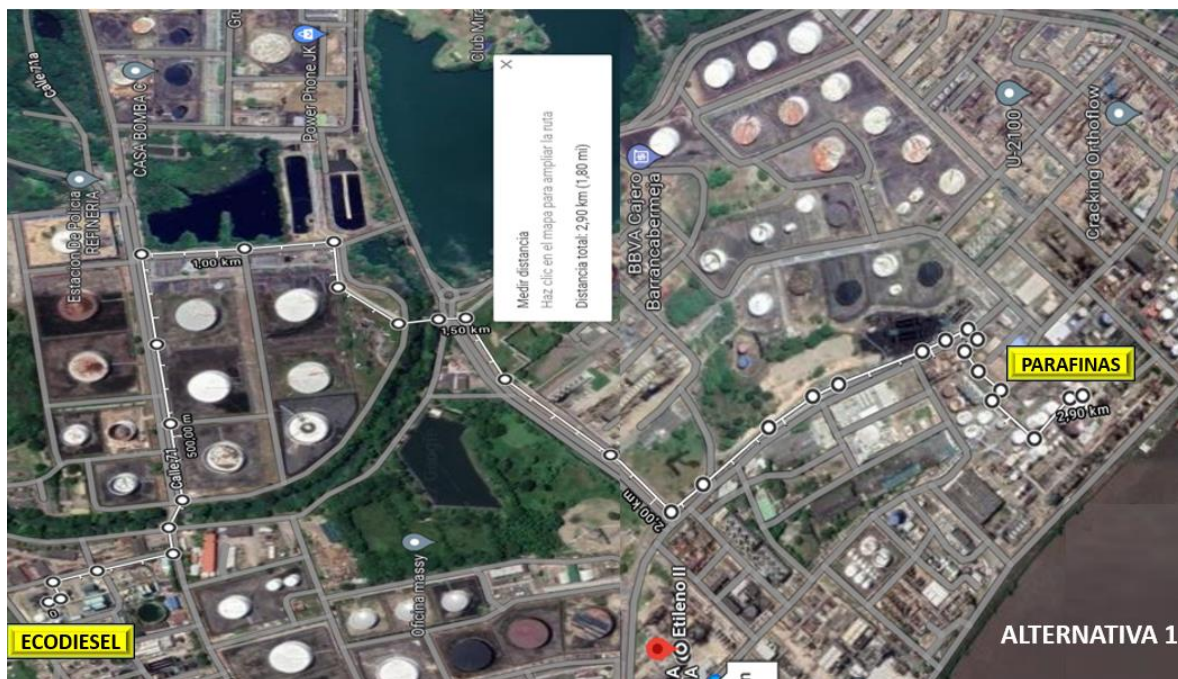


Figura B2. Trazado de tubería 2



Figura B3. Trazado de tubería 3

